

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**

Кафедра астрономии и космической геодезии

БИКМАЕВ И.Ф.

**СОВРЕМЕННОЕ НАУЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
1.5-М ТЕЛЕСКОПА РТТ-150**

Учебное пособие

Казань – 2015

УДК 520.2-4
ББК В22

*Принято на заседании кафедры астрономии и космической геодезии
Протокол № 12 от 15 мая 2015 года*

Рецензент:
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Института астрономии РАН
Н.С. Бахтигараев

Бикмаев И.Ф.
Современное научное оборудование 1.5-м телескопа РТТ-150
(Учебное пособие) /

И.Ф. Бикмаев – Казань: Казан. ун-т, 2015. – 60 с.

Излагаются основные технические характеристики 1.5-метрового оптического телескопа Казанского университета, установленного в горах Турции в Государственной обсерватории ТЮБИТАК близ г. Анталя по международному соглашению между КФУ, ИКИ РАН и ТЮБИТАК.

Телескоп именуется как Российско-Турецкий телескоп (РТТ-150).

В пособии подробно изложены основные параметры современного научного оборудования телескопа – крупногабаритного эшелле-спектрометра высокого разрешения, ПЗС-фотометра на основе малошумящей высокочувствительной матрицы ANDOR, спектрометра низкого разрешения TFOSC.

Приведены результаты тестирования позиционных и фотометрических характеристик научного оборудования и показано, что по своим техническим параметрам РТТ-150 соответствует лучшим телескопам мира с диаметрами зеркал 1-3 метра.

В отсутствие современных учебников по экспериментальной астрофизике, пособие является существенным дополнением при изучении курса “Практическая астрофизика” студентами по специальности “Астрономия”

© Бикмаев И.Ф., 2015

© Казанский университет, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ	СТР.
1. ВВЕДЕНИЕ	4
2. Оптическая схема телескопа РТТ150	13
3. Современное научное оборудование телескопа РТТ150	19
3.1. Крупногабаритный эшелле – спектрометр высокого разрешения в фокусе Кудэ	22
3.1.1. Оптическая схема спектрометра	24
3.1.2. Позиционная точность спектрометра высокого разрешения	37
3.1.3. Тестирование предельных позиционных точностей с использованием йодной ячейки	39
3.1.4. Фотометрические характеристики спектрометра высокого разрешения	43
3.1.5. О возможности применения ПЗС-матрицы АНДОР в спектроскопии высокого разрешения	46
3.2. Фотометр на основе ПЗС-матрицы фирмы ANDOR	50
3.2.1. Основные технические характеристики ПЗС-матрицы ANDOR	51
3.2.2. Фотометрическая система	53
3.3. Камера прямых изображений и спектрометр низкого и среднего разрешения TFOSC	54
3.3.1. Механическая и оптическая схемы TFOSC	55
3.3.2. Предельные точности определения лучевых скоростей с прибором TFOSC	57
Заключение	60

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптический телескоп АЗТ-22 с диаметром главного зеркала 1.5-метра был заказан Казанским госуниверситетом в 1976 году и его изготовление на АО ЛОМО (С-Петербург) было завершено в 1995 году. По международному проекту между Россией и Турцией была выполнена установка телескопа на территории Государственной обсерватории ТЮБИТАК (TUBITAK - Совет по научно-техническим исследованиям Турции) в 50 км от г. Анталя на горе Бакырлытепе (“Медная гора”, высота 2500 метров, координаты 2h20m09s E, 36o49’30” N) в 1999 году.

Основной задачей 1.5-м телескопа является наземная поддержка рентгеновских орбитальных обсерваторий, наблюдения на которых проводятся с участием Института космических исследований РАН. Наблюдательное время на телескопе распределено между участниками проекта: Казанским федеральным университетом, Институтом космических исследований РАН и Государственной обсерваторией ТЮБИТАК. По согласованию участников международного проекта телескоп именуется как Российско-Турецкий оптический телескоп с диаметром зеркала 150-см, кратко “РТТ150” или “РТТ-150”.

По своей оптической схеме и механической конструкции телескоп РТТ150 аналогичен телескопу АЗТ-22 Московского университета, установленному на горе Майданак в Узбекистане в 1989 году. Основная оптическая система выполнена по схеме Ричи-Кретьена.

Этапы работы со стороны Казанского университета с момента заказа телескопа в 1976 году и до завершения его изготовления на АО ЛОМО в 1995 году были выполнены Ш.Т.Хабибуллиным, Н.А.Сахибуллиным, А.А.Нефедьевым, Н.Г.Ризвановым, Г.В.Жуковым.

Профессор Н.А.Сахибуллин является научным руководителем проекта РТТ-150 со стороны КФУ.

Автор подключился к работам по телескопу РТТ150 с момента его

заключительных испытаний на стенде АО ЛОМО (С-Петербург) весной 1995 года (рис.1.1). Вся дальнейшая работа по разборке телескопа на ЛОМО, транспортировке его в Турцию, строительству здания для телескопа в горах на высоте 2500 метров, монтажу механики и юстировок оптики телескопа проходила с непосредственным участием автора и под контролем с его стороны. Исключительно важную часть работы по организации и осуществлению этих этапов со стороны ИКИ РАН выполнил зам. директора ИКИ РАН д.ф.м.н М.Н.Павлинский. Куратором работ по РТТ-150 со стороны ИКИ РАН является академик Р.А.Сюняев.



Рис. 1.1. Телескоп АЗТ-22 (РТТ150) во время заключительных испытаний на стенде АО ЛОМО (С-Петербург) весной 1995 года. Снимок автора.

В начале 1995 г. на ЛОМО было завершено изготовление телескопа и выполнен его полный монтаж в специальном сборочном цехе ЛОМО. В апреле 1995 г. были выполнены его заключительные испытания в цеховых

условиях.

Этап перевозки телескопа из России (С-Петербург) в Турцию (Анталья) состоялся летом 1995 года. Перевозка была осуществлена на 4-х крупногабаритных трейлерах при сопровождении российскими (И.Ф.Бикмаев, М.Э.Ишмухаметов) и турецкими (З.Аслан, С.Селам) участниками проекта на соответствующих этапах маршрута по территории России и Турции.

В 1996 году в горах на территории Государственной обсерватории ТЮБИТАК был заложен фундамент здания для телескопа.

Конструкция здания телескопа имеет принципиальное значение в современных условиях для достижения предельных точностей астрономических наблюдений. Классический подход к строительству зданий крупных телескопов в Европе и в России состоял ранее в том, что рабочие помещения, комнаты отдыха астрономов и техников (с целью экономии средств и удобства работы) располагались внутри самого здания, на один - два этажа ниже подкупольного помещения, где находится сам телескоп. По такому принципу, в частности, построены здания для 6-м и 1-м телескопов САО РАН на Северном Кавказе и классические здания многих астрономических обсерваторий республик бывшего СССР и мира, особенно в Европе.

Исследования астроклимата подкупольного пространства в 1980-е годы, особенно тщательно выполненные сотрудниками МГУ на Обсерватории Майданак в Узбекистане, показали, что здание телескопа, по-возможности, не должно содержать в себе обогреваемые помещения, так как теплый воздух неизбежно проникает в подкупольное пространство и ухудшает качество изображений.

Кроме того, было показано, что телескоп желательно устанавливать на высоте не менее 10 метров от уровня земли, чтобы избавиться от флуктуаций температуры воздуха в приземных слоях, особенно сразу после захода Солнца. Таким образом, здание должно быть достаточно высоким.

Для телескопа РТТ150 автором была предложена оригинальная схема здания, которое должно также содержать специальное помещение фокуса Куде, где будет размещена крупногабаритная оптика стационарного спектрометра. Это помещение должно быть тепло и светоизолированным, представлять собой своеобразный термостат. То есть здание должно иметь 2 стены – внешнюю и наружную. В нем допускаются лишь сезонные изменения температуры от лета к зиме. В течение суток, независимо, день или ночь, температура внутри помещения Куде должна быть стабильной в пределах пол-градуса.

В связи с указанным, проект здания 1.5-м телескопа детально обсуждался автором совместно с турецким архитектором Ерканом Шахмалы во время поездки турецкой делегации в САО РАН и во время поездки автора в Турцию летом 1995 года. В результате, турецкая сторона практически полностью приняла требования к техническому заданию к конструкции башни телескопа, предложенные автором, в котором, по-возможности, были учтен опыт проектирования и эксплуатации зданий оптических телескопов, накопленный в ряде советских и российских обсерваторий. На основе этого в сентябре 1995 года турецким архитектором Ерканом Шахмалы был подготовлен эскизный проект здания для телескопа РТТ150, а в 1996 году им была выполнена детализировка всех этажей здания.

Строительство здания для телескопа РТТ150 на вершине горы было выполнено в период 1996-1997 гг. силами турецких строительных организаций.

В момент строительства основных элементов здания летом 1997 года автор постоянно находился рядом и контролировал все основные этапы и детали строительства здания, которые могли в дальнейшем повлиять на качество астрономических наблюдений.

Здание для 1.5-телескопа является 3-х этажным – на первом этаже располагается система управления телескопа и рабочая комната наблюдателей, на 2-м этаже находится помещение для Кудэ-спектрометра, на 3-м этаже установлен сам телескоп РТТ150. Высота установки телескопа

составляет 12 метров над поверхностью земли, высота верхней кромки купола – 18 метров (рис.1.2).

В схеме здания предусмотрены воздушные перекрытия, по-возможности, предотвращающие проникновение теплого воздуха от силовых элементов системы управления телескопом на 1-м этаже в подкупольное пространство (рис.1.3). В настоящее время система автоматического управления телескопа, созданная российскими участниками проекта – КФУ и ИКИ РАН - и опыт ее успешного использования, позволяют начать переход к дистанционным методам наблюдений, при которых комната астрономов-наблюдателей может быть вынесена за пределы здания телескопа.

На рис. 1.2 показан вертикальный разрез эскизного проекта здания 1.5-м телескопа.

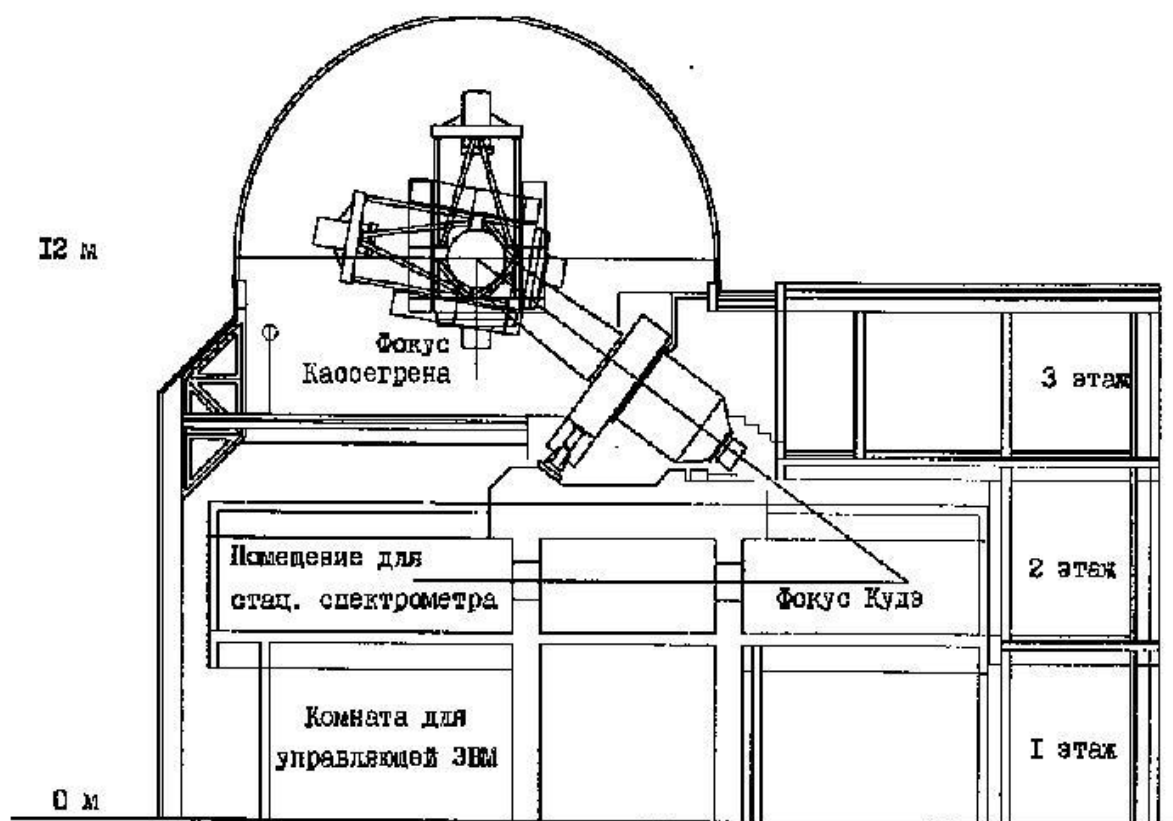


Рис. 1.2. Вертикальный разрез здания телескопа РТТ150, техническое задание на проектирование которого было подготовлено летом 1995 г.

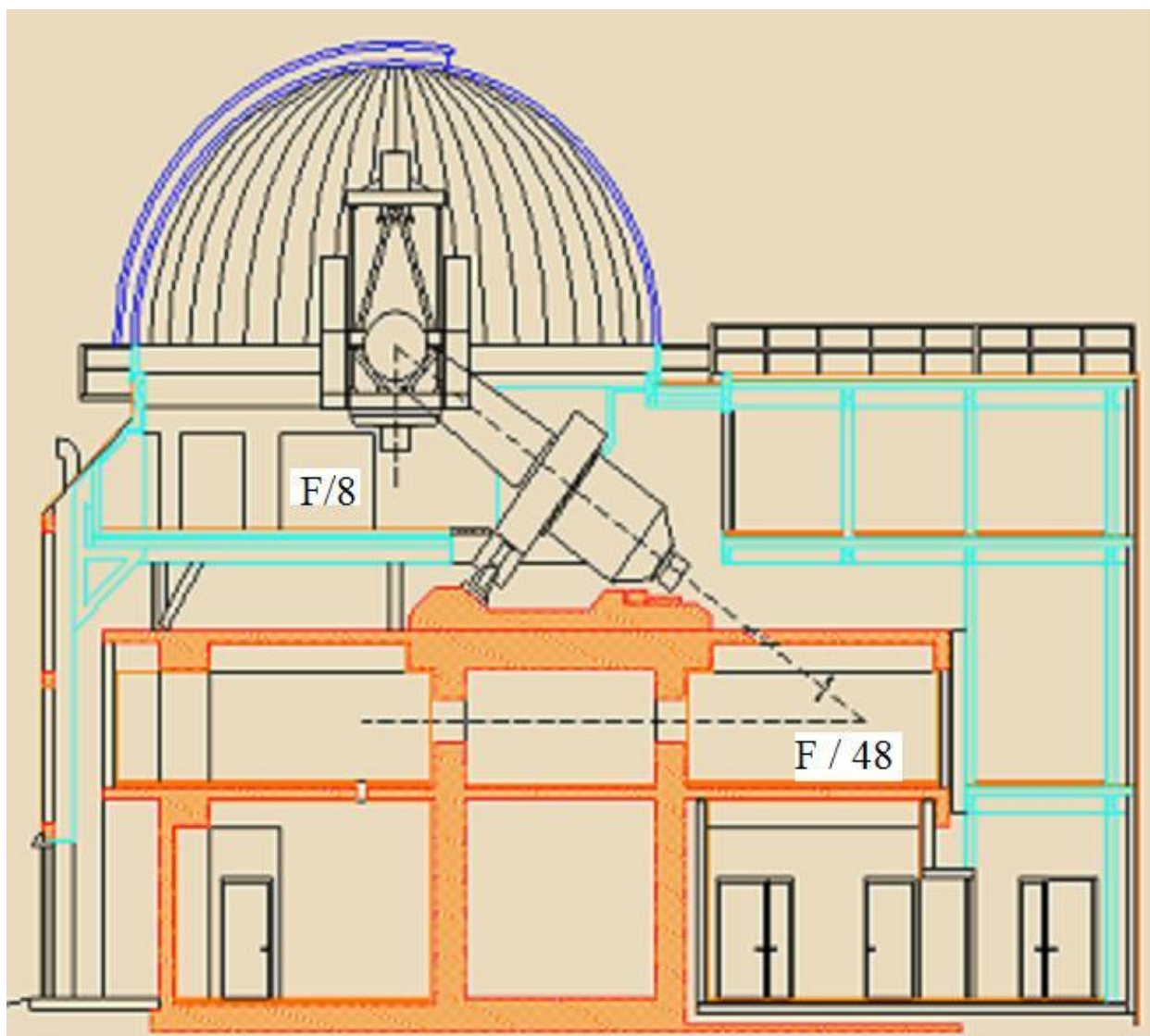


Рис. 1.3. Вертикальный разрез здания телескопа РТТ150, детализация чертежей и строительство которого было осуществлено турецкой стороной в 1995-1997 гг.

Монтаж механических, электрических и оптических элементов был осуществлен совместным коллективом АО ЛОМО (С.Ф.Камус, Л.А.Дембо, Н.А.Климантович), КФУ (И.Ф.Бикмаев, Р.И.Гумеров, М.Э.Ишмухаметов, Д.Сенья) и Государственной Обсерватории ТЮБИТАК (З.Аслан, Д.Илдиз, Р.Сонмез) в летние сезоны 1997-1998 гг.

Очень важный этап работы по взаимной геодезической привязке фундамента, купола и механических элементов телескопа (к направлению меридиана,

широте места и горизонту) был выполнен с использованием опыта высококвалифицированных геодезистов кафедры астрономии КФУ – доцента Р.В.Загретдинова и научного сотрудника М.Э.Ишмухаметова.

Летом 2000 года был реализован этап юстировки оптики с использованием диафрагмы Гартмана размером 1.5-метра и установленной перед зеркалами телескопа. Основными исполнителями этой работы были сотрудники ИКИ РАН Э.А.Витриченко и А.Л.Яскович, которые сделали все необходимые обмеры гартмановских снимков (полученных с помощью ПЗС-матрицы ST8E и приобретенной ИКИ РАН для РТТ150) и расчеты взаимных наклонов и децентрировки зеркал. В результате выполнения этого этапа работы удалось довести точность юстировки до уровня концентрации 50 процентов энергии в кружке 0.4 угловой секунды.

Летом 2003 года отдельно была выполнена геометрическая юстировка оптики системы F/48 телескопа, включающая 5 вторичных зеркал фокуса Куде, с привязкой оптической оси системы F/48 к системе F/8. Эта работа была выполнена автором совместно с сотрудниками CAO РАН В.А.Викульевым и Ф.А.Мусаевым.

Летом 2003 года при непосредственном участии автора была осуществлена авиа-транспортировка оптико-механических деталей Куде-эшелле спектрометра (7 ящиков общим весом 400 кг) из Казани в Анталию.

Осенью 2003 года автором совместно с В.А.Викульевым (CAO РАН) была выполнена работа по юстировке уже собственно оптико-механических элементов Куде-эшелле спектрометра, стационарно установленных в специальной комнате на 2-м этаже здания телескопа, что позволило выполнить тестовые, а затем и начать и регулярные наблюдения звезд с высоким спектральным разрешением.

В 1998-2007 гг. автор принимал участие в работах по созданию и развитию системы автоматического управления телескопа РТТ150. Основную работу в создании системы автоматического управления телескопа выполнил ведущий научный сотрудник КФУ Р.И.Гумеров при поддержке коллег из ИКИ РАН (М.Н.Павлинский, И.В.Чулков, М.В.Бунтов). На всех этапах этой части работы автор обеспечивал “обратную связь” между астрономической и технической сторонами этой работы. В частности, для увеличения точности наведения телескопа автором были выполнены циклы исследований (совместно с Галеевым А.И.) по наведению телескопа на звезды с известными видимыми координатами, что позволило выявить систематические ошибки наведения в зависимости от положения телескопа по отношению к горизонту и сторонам света. Была составлена сетка невязок наблюдений в зависимости от азимута, часового угла и высоты трубы телескопа над горизонтом. Были найдены аналитические аппроксимации этих невязок в виде полиномов 2-3 порядка и эти эмпирические отклонения в виде аналитических выражений были интегрированы в программу автоматического наведения телескопа.

В результате, точность наведения телескопа была поднята в несколько раз – от начального уровня в 2-5 угловых минут до уровня в 10-20 угловых секунд. Ограничение на уровне 10-20 угловых секунд связаны с конструкцией оправы главного зеркала, которая допускает малые наклоны зеркала внутри оправы. Жесткий зажим зеркала в оправе может привести разрушению зеркала при длительной эксплуатации его в режиме наблюдений (постоянных наклонов телескопа и зеркала в разные стороны).



Рис. 1.4. Автор (в центре) с персоналом Турецкой обсерватории в период его обучения астрономическим наблюдениям на РТТ150.



Рис. 1.5. Государственная обсерватория ТЮБИТАК на высоте 2500 метров. В центре на вершине горы - здание РТТ150.

2. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ТЕЛЕСКОПА РТТ150

Телескоп РТТ150 изготовлен как универсальный инструмент, способный решать многие задачи оптической наблюдательной астрономии. Такая универсальность была достигнута с помощью созданной системы сменных вторичных зеркал, плоских зеркал и линзовых корректоров. Всего в комплекте телескопа имеются:

одно главное зеркало диаметром 1.5-метра, 3 сменных вторичных зеркала (для оптических систем F/8, F/16, F/48), 4 плоских зеркала для обеспечения фокуса Кудэ и 3 линзовых корректора для обеспечения широкого поля зрения вплоть до 300 мм в системе F/8. Различной комбинацией зеркал можно реализовать набор оптических схем, определяемых требованиями наблюдательной задачи. Телескоп РТТ150 построен на основе самой совершенной на сегодняшний день для монозеркальных систем оптической схеме Ричи-Кретьена. Под монозеркальностью подразумевается то, что телескоп имеет монолитное жесткое главное зеркало.

Дальнейшее развитие наземных оптических телескопов идет по пути создания многозеркальных и адаптивных (с гибким главным зеркалом, деформацией которого компенсируются атмосферные искажения) систем.

Схема Ричи-Кретьена подразумевает наличие главного зеркала, имеющего форму вогнутого гиперboloида вращения, и вторичного зеркала, имеющего форму выпуклого гиперboloида вращения. Ход лучей в телескопе РТТ150 показан на Рис.2.1. Лучи, отраженные главным зеркалом (1), перехватываются вторичным зеркалом (2) и направляются либо через отверстие в главном зеркале на приборы фокуса Ричи-Кретьен (3), либо через систему плоских зеркал (4) в фокус Кудэ (5).

Схема Ричи-Кретьена обеспечивает довольно большое поле зрения телескопа, не искаженное аберрациями (см. ниже). Однако, для обеспечения еще большего поля

зрения, что необходимо для специализированных панорамных

широкоугольных наблюдений, предусмотрено введение линзовых корректоров перед фокальной поверхностью систем F/8 и F/17 для исправления астигматизма и кривизны поля на его краях.

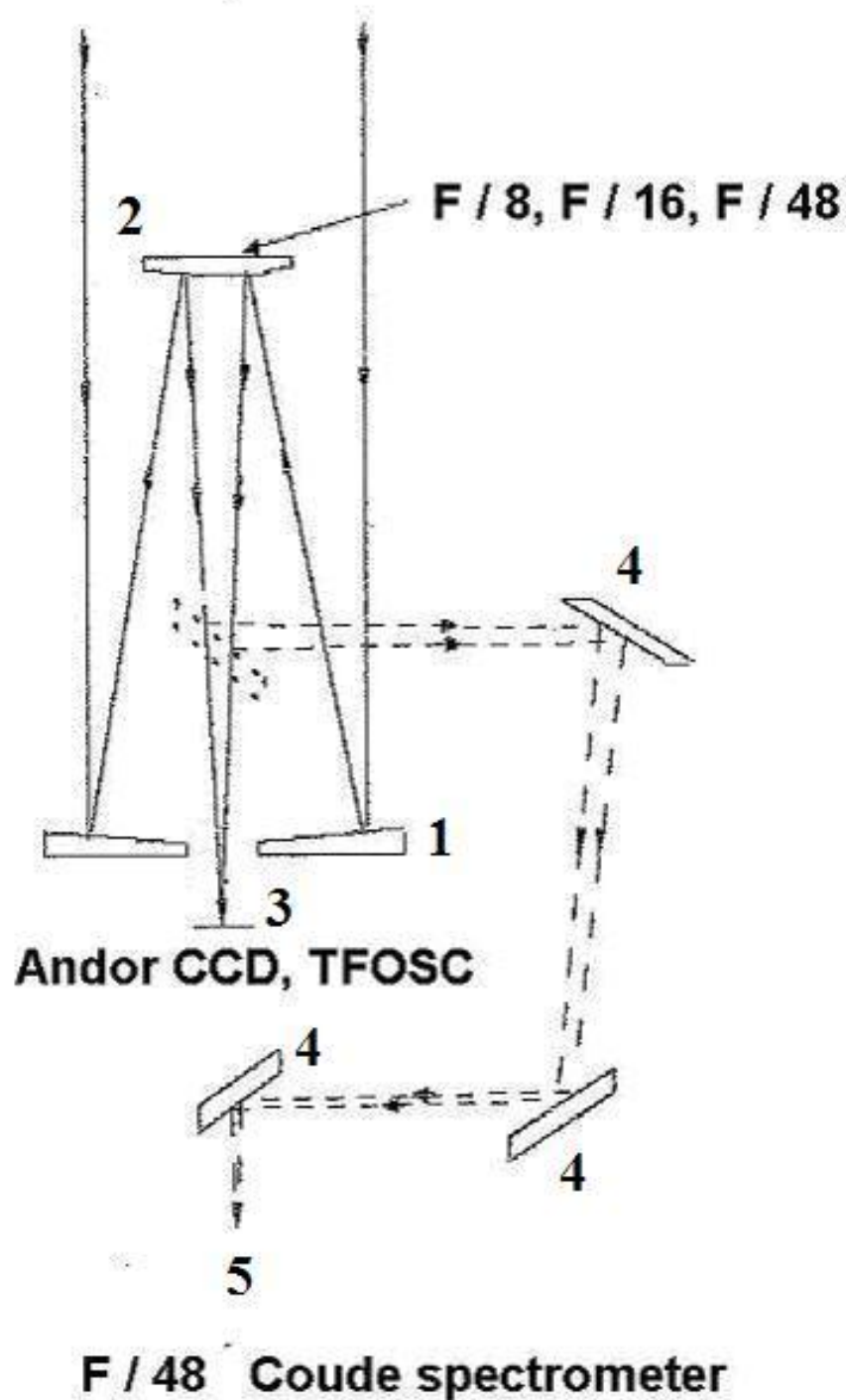


Рис. 2.1. Ход лучей систем Ричи-Кретьена и Кудэ в телескопе РТТ150.

Оптика телескопа РТТ150 имеет следующие технические характеристики:

Таблица 2.1. Состав основных зеркал телескопа (все размеры даны в мм)

Зеркало	Диаметр	Стрелка кривизны
Главное зеркало 1	1500	31.47
Вторичное зеркало 2	580	8.63
Вторичное зеркало 3	300	5.20
Вторичное зеркало 4	350	6.94
Плоское зеркало 5	440x312	-
Плоское зеркало 6	340x280	-
Плоское зеркало 7	385x225	-
Плоское зеркало 8	300x206	-

Примечание. Главное зеркало имеет центральное отверстие диаметром 580 мм для передачи широкого поля зрения диаметром 300 мм (которое в данный момент не используется, см. ниже). Главное зеркало изготовлено из ситалла СО-115М и не подвержено температурным деформациям.

Комбинацией описанных выше элементов можно получить 6 оптических схем, обеспечивающих большое разнообразие получаемого поля зрения, масштаба изображения и освещенности единицы площади светоприемника. Ниже приведено краткое описание двух основных оптических схем. Главной характеристикой каждой системы является ее относительное отверстие A , или отношение диаметра главного зеркала к эквивалентному фокусному расстоянию телескопа. Например, схема 1:7.7 обозначается как $F/7.7$ и является относительным отверстием.

Система F / 7.7 без корректора, комплектуется из зеркал 1 и 2

Эквивалентное фокусное расстояние - 11611 мм

Относительное отверстие - 1:7.7

Линейное поле зрения - 90 мм

Угловое поле зрения - 26 минут 40 секунд

Центральное экранирование - 25.8 %

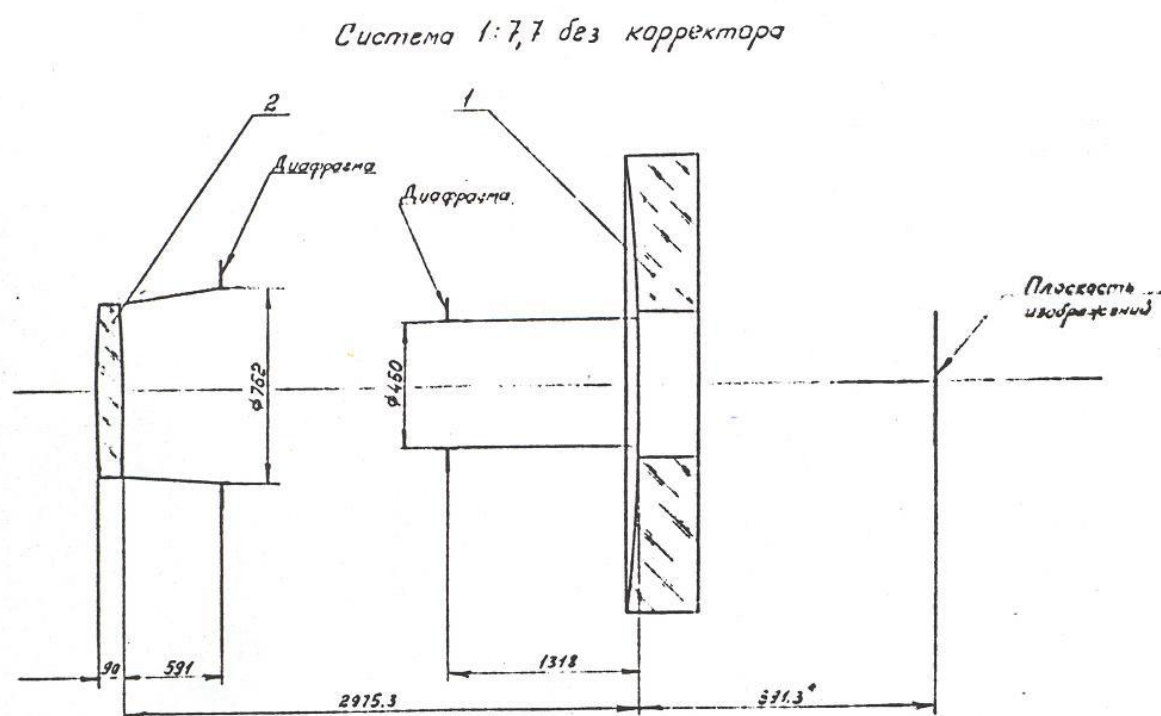


Рис.2.2. Оптическая схема системы F / 7.7 без корректора

Система F / 48 (фокус Кудэ), комплектуется из зеркал 1,4,5,6,7 и 8

Эквивалентное фокусное расстояние - 72257 мм

Относительное отверстие - 1:48

Линейное поле зрения - 80 мм

Угловое поле зрения – 3 минуты 50 секунд

Центральное экранирование - 17 %

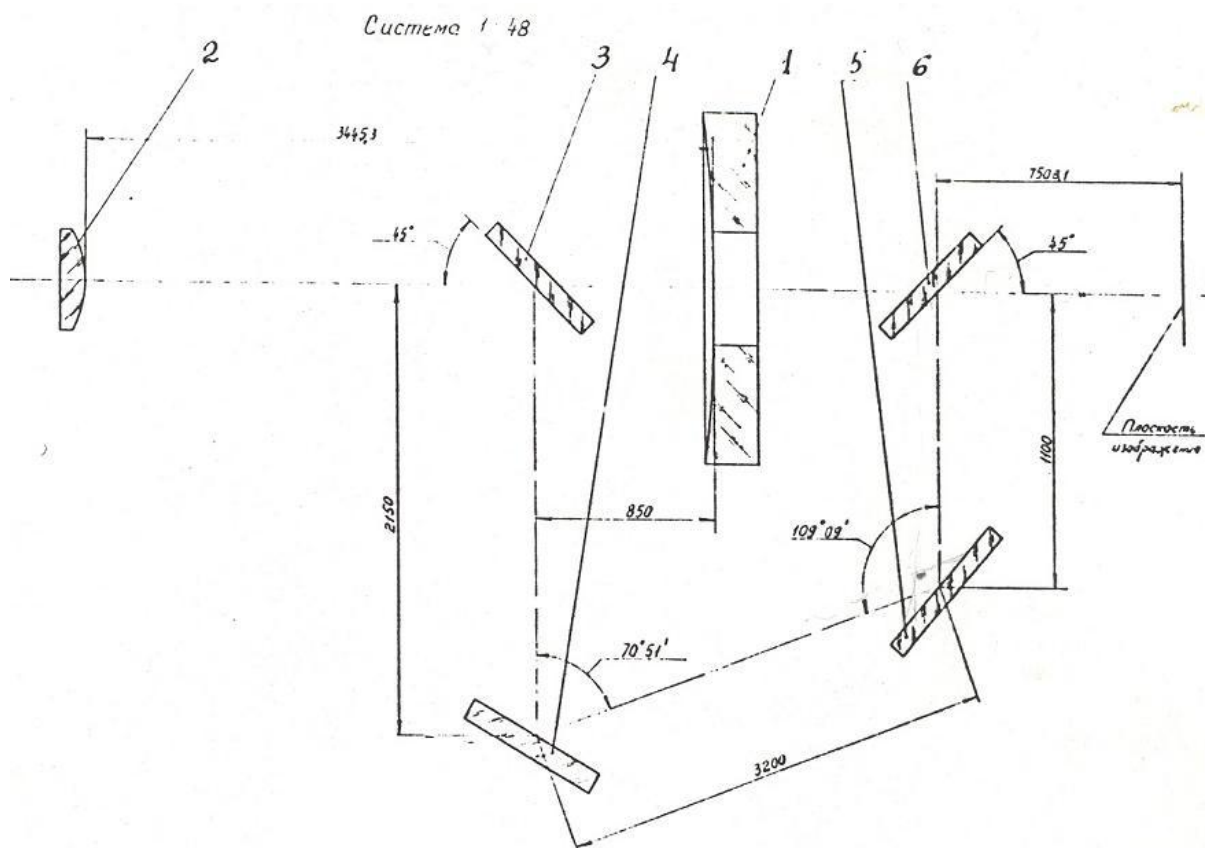


Рис. 2.3. Оптическая схема системы $F/48$ (фокус Кудэ – “ломаный”)

Системы $F/7.7$, $F/17.3$, $F/3$ с корректорами изображений изначально (1970-е годы) проектировались для использования с крупноформатными фотопластинками с размерами от 100 x 100 мм ($F/3$, $F/17.3$) до 300 x 300 мм ($F/7.7$). Фотографические методы в астрономии исчезли в конце 1980-х гг. в связи с революционным переходом на использование ПЗС-матриц. Однако, геометрические размеры даже относительно крупноформатных ПЗС-матриц 2048 x 2048 элементов (с характерным размером пиксела в 15 микрон) составляют лишь около 30 мм. Несколько телескопов в мире, имеющих такую же оптику с широким полем зрения как у РТТ150, оснащены мозаиками из десятков ПЗС-чипов с общей рабочей площадью порядка 160 x 160 мм. Однако, стоимость таких мозаик в настоящее время превышает на

порядок стоимость самого телескопа и приобретение их для телескопа РТТ150 в российских условиях является нереальной задачей. Кроме того, указанные системы с корректорами для РТТ150 проектировались в эпоху фотографических наблюдений и их оптические свойства (минимальные кружки аббераций – функции рассеяния точки, и полосы пропускания), скорее всего, оптимизированы для сине-зеленой областей спектра (полосы В и V фотометрической системы Джонсона), где чувствительность фотопластинок была максимальной. А ПЗС-матрицы имеют максимум чувствительности в красной области спектра (полоса R).

В связи с указанными обстоятельствами, и по опыту выполнения реальных наблюдательных программ на телескопе РТТ150 в 2000-2005 гг, наиболее востребованными оказались 2 оптические системы – F/7.7 без корректора в фокусе Ричи-Кретьена (более краткая запись F/8) и система F/48 для фокуса Кудэ.

3. Современное научное оборудование телескопа РТТ150

В данном разделе дано описание и результаты исследования параметров научного оборудования телескопа РТТ150. Автору принадлежат идея и основная работа по созданию для 1.5-м телескопа стационарного куде-эшелле спектрометра. Автор принял участие в работах по настройкам, калибровкам и внедрению в наблюдения на РТТ150 двух других научных инструментов телескопа – ПЗС-фотометра с матрицей ANDOR и спектрометра низкого разрешения TFOSC.

К моменту создания телескопа РТТ150 на АО ЛОМО в 1995 году, в оптической наземной астрономии произошел революционный переход (1985-1995 гг.) на повсеместное использование твердотельных фотоэлектрических приемников излучения – ПЗС-матриц - благодаря ряду их неоспоримых преимуществ (высокая чувствительность в широком спектральном диапазоне, малые шумы считывания сигнала, цифровая регистрация сигнала и др.) перед ранее используемыми детекторами (фотопластинки, ФЭУ, телевизионные системы). В связи с этим, принципиально изменились также и оптико-механические конструкции спектральных приборов, ориентированных на использование высокочувствительных, но геометрически малоформатных ПЗС-матриц. Таким образом, классическое научное оборудование 1.5-м телескопа РТТ150, созданное на АО ЛОМО – одноканальный фотометр с ФЭУ, фотографическая кассета и подвесной спектрометр, использующие фотопластинки, оказались полностью невостребованными для выполнения наблюдений (в частности, все фирмы прекратили изготовление фотопластинок для астрономии). Поэтому задача создания и внедрения современного научного оборудования 1.5-м телескопа стала основной с момента его установки в Национальной обсерватории ТЮБИТАК (Турция).

Основываясь на мировом опыте использования телескопов средних размеров (1-3 метра) и на опыте многолетней работы в САО РАН совместно с Ф.А.Мусаевым, автором было предложено создать для телескопа РТТ150 крупногабаритный спектрометр высокого разрешения для решения задач звездной астрофизики, требующих спектры высокой точности. Такой прибор изначально отсутствовал в комплекте 1.5-телескопа, но к счастью, ЛОМО предусмотрело изготовление оптической системы F/48 (оптика + механика) для выноса света за пределы телескопа в потенциальное помещение фокуса Кудэ. Автором было предложено использовать данную техническую возможность 1.5-м телескопа (на Майданакском телескопе она не была реализована), а именно, предусмотреть в конструкции здания телескопа РТТ150 специальное термостатированное помещение и изготовить комплект высокоточного крупногабаритного спектрометра. Крупногабаритный спектрометр высокого разрешения, оснащенный современной ПЗС-матрицей, стал вкладом Казанского университета в состав современного научного оборудования телескопа и стимулировал пропорциональный вклад других участников международного проекта РТТ150 (Национальная обсерватория ТЮБИТАК и ИКИ РАН) в дело оснащения телескопа современным научным оборудованием. Объективная необходимость включения спектрометра высокого разрешения в состав научного комплекса с точки зрения эффективного использования телескопного времени связана со следующими обстоятельствами:

1) Примерно половину месяца ночное небо в оптическом диапазоне спектра сильно подсвечивается солнечным светом, отраженным от поверхности Луны. Эта естественная фоновая подсветка неба на порядки превышает искусственную подсветку от крупных городов. В эти периоды очень затруднительно или невозможно выполнение в фокусе Ричи-Кретьена высокоточных фотометрических наблюдений или регистрация изображений, а тем более, спектров слабых источников. Телескоп с диаметром зеркала в

1.5-метра становится малоэффективным и неконкурентоспособным по сравнению с более крупными телескопами в такие периоды времени.

2) Телескопы средних размеров (с зеркалами 1-3 метра) могут быть оснащены стационарными, позиционно и термо- стабилизированными спектрометрами высокого разрешения, так как относительно небольшие габариты таких телескопов (5-7 метров) позволяют разместить крупногабаритные спектрометры в отдельных, но близлежащих помещениях внутри одного и того же здания для телескопа. Крупные телескопы мира с альт-азимутальной конструкцией лишены такой естественной возможности, и крупногабаритные спектрометры размещаются у них на платформах фокуса Нэсмита. Недостатком такого размещения является подверженность спектрометров фокуса Нэсмита влиянию флуктуаций температуры воздуха в подкупольном пространстве. Возможны позиционные нестабильности из-за размещения спектрометра на конструкции телескопа, которая движется в процессе наведения на объекты и ведения во время экспозиций.

Именно поэтому, наиболее высокоточные спектроскопические наблюдения выполняются в настоящее время с помощью стационарных крупногабаритных спектрометров, установленных в отдельных помещениях фокуса Куде телескопов класса 1-3-метра.

3) Созданная профессором Н.А.Сахибуллиным в КФУ “Ведущая научная Школа РФ по исследованию звездных атмосфер” объективно нуждалась в наличии собственной экспериментальной установки. Она необходима для развития современных численных методов расчетов спектров звездных атмосфер.

Указанные обстоятельства и стали побудительными аргументами для автора и КФУ для включения спектрометра высокого разрешения в состав создаваемого комплекса научного оборудования.

3.1. Крупногабаритный эшелле спектрометр высокого разрешения в фокусе Кудэ

Проектирование помещения и размещения в нем оптико-механических элементов кудэ-эшелле спектрометра РТТ150 было выполнено автором совместно с сотрудником САО РАН Ф.А.Мусаевым на основе опыта, приобретенного в ходе совместной работы по исследованию характеристик кудэ-эшелле спектрометров 1-м телескопа “Цейсс-1000” САО РАН и 2-м телескопа “Цейсс-2000” на пике Терскол.

При этом все оптические расчеты характеристик спектральных камер, сочетания эшелле-решетки и призм кросс-дисперсии, а также оптимального формата эшелле-кадра в фокусе камер были выполнены Ф.А.Мусаевым.

Принципиальное различие в случае нового спектрометра для телескопа РТТ150 по сравнению с указанными спектрометрами 1-м и 2-м телескопов заключалась в необходимости изготовления всех оптико-механических элементов спектрометра РТТ150 “с нуля” (1-м и 2-м телескопы производства фирмы Цейсс уже имели крупногабаритную оптику камер и Ф.А.Мусаевым была предложена и реализована принципиально важная трансформация этих классических спектрометров в современные эшелле-спектрометры за счет использования эшелле-решеток и призм в качестве кросс-дисперсеров.

В период 1995-2000 гг. автором совместно с проф. Н.А.Сахибуллиным была выполнена работа по приобретению и организации изготовления всех необходимых комплектующих для спектрометра на российских предприятиях. В 2003 году после оформления автором всех необходимых таможенных документов весь комплект спектрометра (общим весом 400 кг) был вывезен самолетом в Турцию. Турецкая сторона (Директор Проф. Зеки Аслан) обеспечила изготовление необходимых механических приспособлений (металлических столиков) для стационарного размещения

деталей и узлов спектрометра на большой площади в горизонтальной плоскости в отдельной тепло и свето-изолированной комнате. Осенью 2003 года автором совместно с В.А.Викульевым (САО РАН) была выполнена работа по заключительной юстировке оптико-механических элементов Кудэ-эшелле спектрометра, установленных в специальной комнате на 2-м этаже здания телескопа, что позволило выполнять тестовые, а затем и регулярные наблюдения звезд с высоким спектральным разрешением.

В состав крупногабаритной оптики Кудэ-эшелле спектрометра входят следующие элементы:

- 1) сферическое коллиматорное зеркало с фокусным расстоянием 7.2 метра и диаметром 250 мм, задачей которого является преобразование расходящегося пучка, идущего от телескопа через входную щель спектрометра, в параллельный коллимированный пучок света диаметром 150 мм,
- 2) плоское зеркало диаметром 200 мм для отражения коллимированного пучка на эшелле-решетку,
- 3) крупногабаритная эшелле-решетка с размером заштрихованной поверхности 300x200 мм и углом блеска 63.5 градуса производства ГОИ им.Вавилова (С-Петербург)
- 4) набор из 3-х крупногабаритных призм каждая размером 350x205x190 мм и углом при вершине 45 градусов, изготовленных из стекла К8 для работы в диапазоне длин волн 360-1000 нм. Призмы работают в направлении перпендикулярном дисперсии эшелле-решеток и, таким образом, "расщепляют" пространственно отдельные спектральные порядки эшелле-решетки, что приводит к появлению "двумерного" эшелле-кадра.

Две призмы, установленные в одной оправе, работают с короткофокусной камерой ($R = 40000$), а третья призма работает независимо в сочетании с длиннофокусной камерой ($R = 100000$).

- 5) две камеры Шмидта с выносом фокуса наружу для регистрации спектра на ПЗС-матрице. Фокусное расстояние камер Шмидта 380 и 1000 мм,

диаметр сферических зеркал - 0.4 и 0.5 метра. Задачей камер является сведение "цветных" монохроматических параллельных пучков света в точку, размер которой в 15-20 микрон определяется остаточными aberrациями зеркала камеры и согласован с размером единичного элемента ПЗС-матрицы.

6) лампа полого катода с ториевым катодом, заполненная аргоном для формирования калибровочного спектра сравнения с эмиссионными линиями Th+Ar.

7) ленточная вольфрамовая лампа, обеспечивающая получение калибровочного непрерывного спектра.

8) в фокусе камер Шмидта располагается ПЗС-матрица для фотоэлектрической регистрации света.

Камеры Шмидта обеспечивают спектральные разрешения $R = 40000$ (0.15-0.20 Ангстрем) и $R=100000$ (0.07-0.10 Ангстрем) в зависимости от требований конкретной астрофизической задачи.

3.1.1 Оптическая схема спектрометра

При выборе оптической схемы спектрометра был использован опыт создания кудэ – эшелле спектрометров Мусаевsv Ф.А, в оптических схемах которых основной диспергирующий элемент (эшелле-решетка) работает в положении off-plane . При этом эшелле-решетка располагается впереди элемента кросс дисперсии, что исключает переменный наклон спектральных линий вдоль основной дисперсии.

Ниже дается описание оптической схемы Куде эшелле-спектрометра с номерами элементов, соответствующих Рис. 3.1

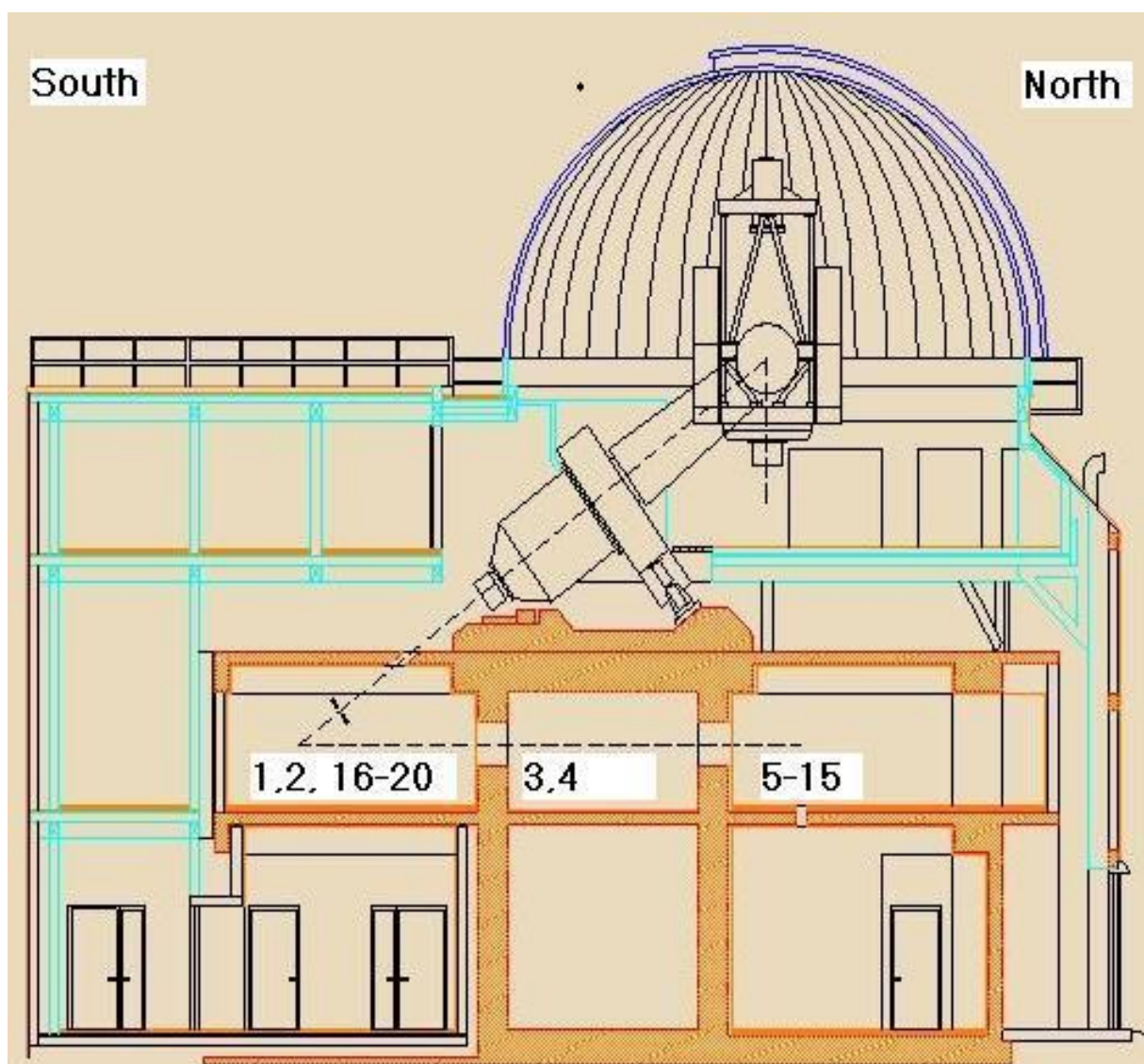


Рис. 3.1. Схема размещения элементов Кудэ эшелле-спектрометра внутри здания телескопа РТТ150.

качество турбулентности атмосферы, а с другой стороны - проекция такой щели в фокусе камеры соответствует размерам двух пикселей ПЗС-матрицы.

Примечание. Необходимо отметить высочайшее качество полировки поверхностей вторичного и 4-х плоских зеркал телескопа РТТ150 – в условиях реальных наблюдений в Куде действительно реализуется качество изображений как минимум \sim в 1.5 угловой секунды, что наблюдается как пропадание изображения звезды внутри входной щели при очень спокойной атмосфере и малой турбулентности. Это означает, что вторичное и плоские зеркала не создают значительную деградацию качества изображения в фокусе Куде, по крайней мере, до уровня рабочей ширины входной щели при работе с камерой $R = 40000$. При наблюдениях с камерой $R = 100000$ ширина входной щели должна быть уменьшена вдвое.

Прошедший через щель (фокус) и расширяющийся пучок $F/48$ попадает на сферическое зеркало коллиматора (3), которое имеет фокусное расстояние $F=7200$ мм и при светосиле фокуса кудэ 1: 48 образует коллимированный пучок света с диаметром $D = 150$ мм. Коллимированный пучок света перебрасывается на эшелле-решетку (5) с помощью плоского зеркала (4), что позволяет расположить оптические камеры “веером”. Эшелле решетка имеет два положения (± 6 градусов) от оптической оси коллимированного пучка света для переброса диспергированного света на одну из используемых во время наблюдений оптических камер ($R = 40000$ или $R = 100000$). При этом механизм щели спектрометра сделан таким образом, что щель может быть легко и быстро развернута на данную ориентацию эшелле-решетки в зависимости от выбора оптической камеры. Указанный разворот щели необходим для компенсации наклона спектральных линий по направлению основной дисперсии.

Примечание. Необходимость введения плоского зеркала (4) для переброса

коллимированного пучка на эшелле-решетку (5) как показано на рис.3.2, вызвано установкой в помещении Кудэ другого спектрального прибора (интерферометр Фабри-Перо), размещенного между щелевой частью (2) и зеркалом (4).

Эшелле-решетка с размером заштрихованной части 300 x 200 мм имеет угол блеска 63.5 градусов и 37.5 штр/мм. В качестве элемента кросс-дисперсии были выбраны призмы (6, 11), которые позволяют оптимально компоновать эшелльные порядки на формате ПЗС-матрицы во всем оптическом диапазоне одновременно. Отметим, что при использовании дифракционных решеток в качестве кросс-дисперсеров, рабочий диапазон эшелле кадра ограничен спектральным диапазоном рабочего порядка решетки. Призмы сделаны из стекла К8 и имеют угол преломления 45 градусов.

В спектрометре задействованы две оптические камеры Шмидта. Короткофокусная камера с $F=380$ мм (7, 8, 9) исполнена в варианте “ломаный Шмидт” для выноса фокуса и регистрации его на ПЗС-матрице (10).

На второй камере с $F=1000$ мм (12, 13) для выноса фокуса используется плоское зеркало (14), установленное перед фокальной плоскостью камеры (15).

Щелевая часть спектрометра оснащена оптико-механическими устройствами (16, 17, 18) для получения спектров калибровочных источников света :

лампа с полым катодом (ЛПК) с ториевым катодом и заполненная аргоном используется для калибровки длин волн и перевода номеров пикселей ПЗС в отсчеты длин волн. Галогенная лампа с вольфрамовой лентой служит для получения калибровочных снимков спектрального “плоского” поля.

Поверхность механизма входной щели имеет размер около 30 мм (~ 100 угловых секунд). Она покрыта алюминием (то есть является зеркальной) и развернута под небольшим углом к оси входного пучка $F/48$. В результате изображение звезды во время процедуры наведения телескопа отражается от

зеркальной поверхности щели (2) и попадает через оптику подсмотра (19) на телевизионную камеру (20), представляющую из себя ПЗС-систему, работающую в телевизионном формате. Изображение от этой вспомогательной ПЗС подсмотра передается по линиям связи на телевизионный монитор на 1-м этаже здания, откуда и осуществляются наблюдения с Кудэ-спектрометром. Имея изображение щели спектрометра, освещенное светом исследуемой звезды, наблюдатель имеет возможность скорректировать положение телескопа двигателями тонкой коррекции и установить изображение звезды таким образом, чтобы свет от нее попадал во входную щель спектрометра. Благодаря такому подсмотру щели удастся обеспечивать эффективное использование света, собранного телескопом. В дальнейшем на узле подсмотра планируется установить цифровую ПЗС-систему и организовать процесс автоматического гидирования во время наблюдений в фокусе Куде. Пример изображения входной щели спектрометра, освещенной калибровочной лампой торий + аргон, показан на рис. 3.3.

В настоящее время используется только короткофокусная камера с разрешением $R=40000$.

С 2003 по 2009 гг. в ее фокусе была установлена азотно-охлаждаемая ПЗС-матрица, изготовленная в САО РАН, с форматом чипа 1160×1040 элементов (16 мкм каждый). При работе с этой матрицей регистрируется 68 эшелле-порядков в диапазоне 3900-8700 Ангстрем (Рис. NN)

При этом в желтой и красной частях спектра порядки не перекрываются из-за ограниченного геометрического размера ПЗС чипа, то есть часть света теряется за пределами ПЗС-чипа ограниченного формата.

С 2009 года была установлена ПЗС-матрица фирмы ANDOR (приобретена за счет МПА, Германия) с размером чипа 2048×2048 элементов.



Рис. 3.3. Изображение входной щели спектрометра на телевизионном мониторе. Наклон щели связан с разворотом эшелле-решетки к оси коллимированного пучка. Щель освещена светом калибровой лампы торий + аргон.

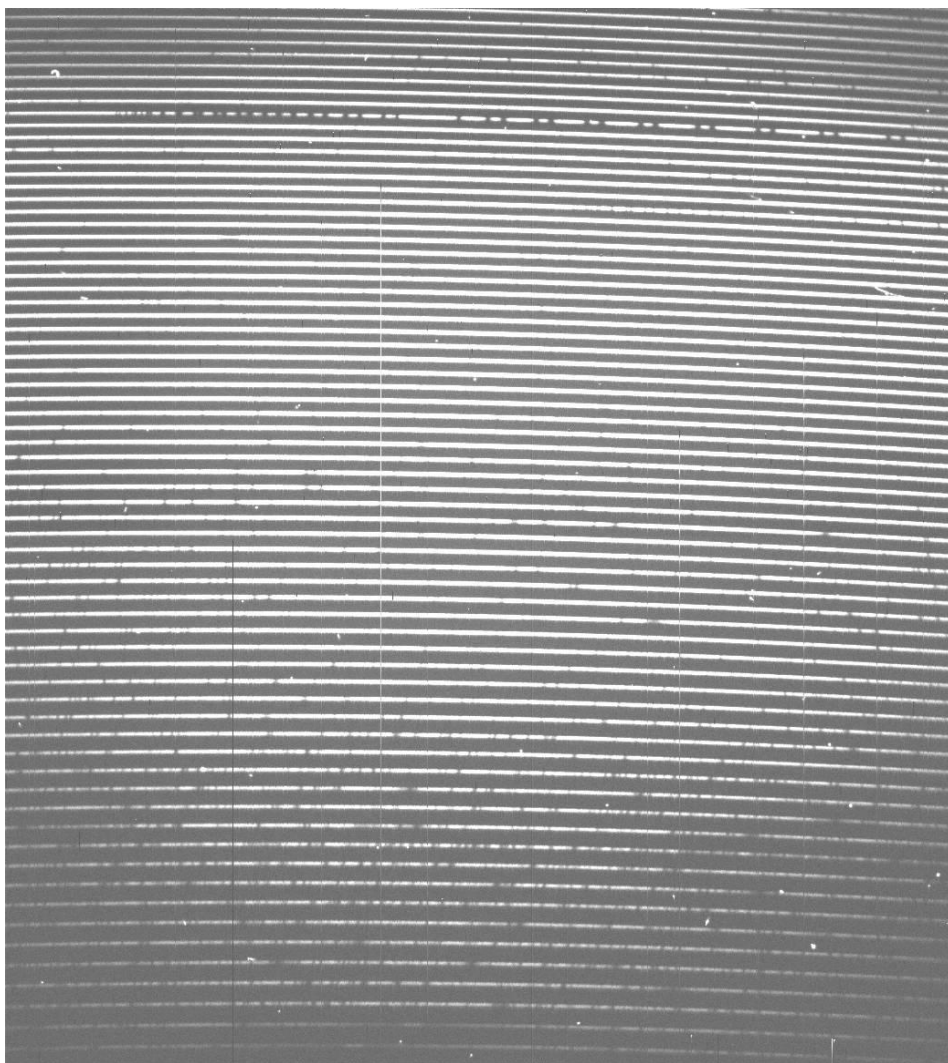


Рис. 3.4. Эшелле-кадр звезды К-гиганта HD165902, $V \sim 7$ mag, зарегистрированный в течение 15-минутной экспозиции. Белые точки – следы космических частиц. Для предотвращения заполнения ими ПЗС-кадра, отдельные экспозиции продолжительностью более 30 минут не рекомендуются. Длинные вертикальные линии – косметические дефекты ПЗС-матрицы. Светлые горизонтальные полосы (68 штук) – эшелле порядки непрерывного спектра звезды с наложенными на него линиями поглощения – темные полосы-черточки. В нижней части спектра – синяя часть ~ 3900 Å, в верхней части – ближняя инфракрасная область ~ 8700 Å. Широкие полосы в порядке N 8 – теллурические линии земной атмосферы на длине волны ~ 7600 Å

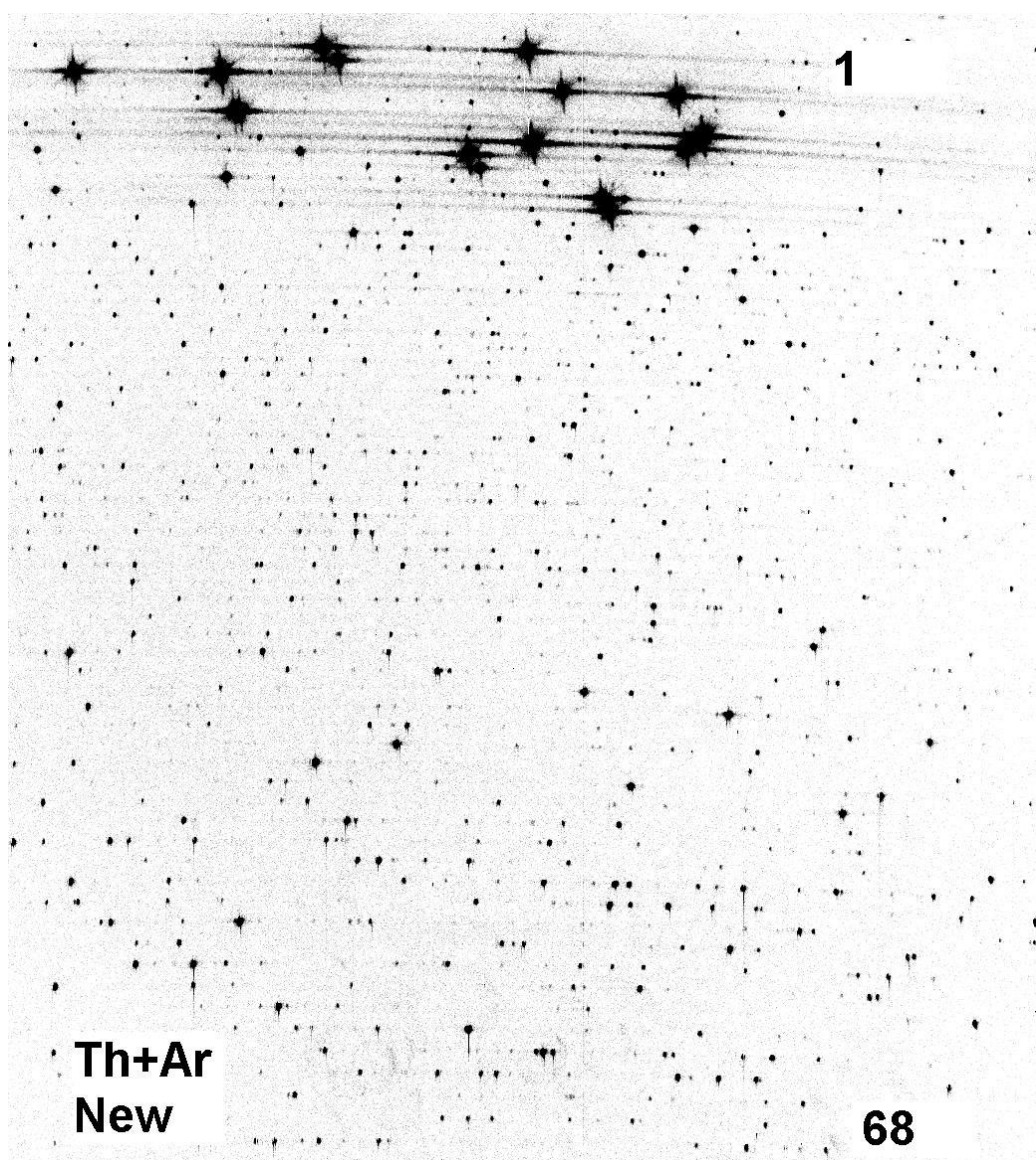


Рис. 3.5. Пример эшелле-кадра, аналогично показанному на рис. 3.4, но здесь зафиксирован эмиссионный спектр калибровочной лампы торий + аргон. Он используется для калибровки длин волн на основе Атласа линий Th+Ar подготовленного автором для всех 68 порядков эшелле-спектра.

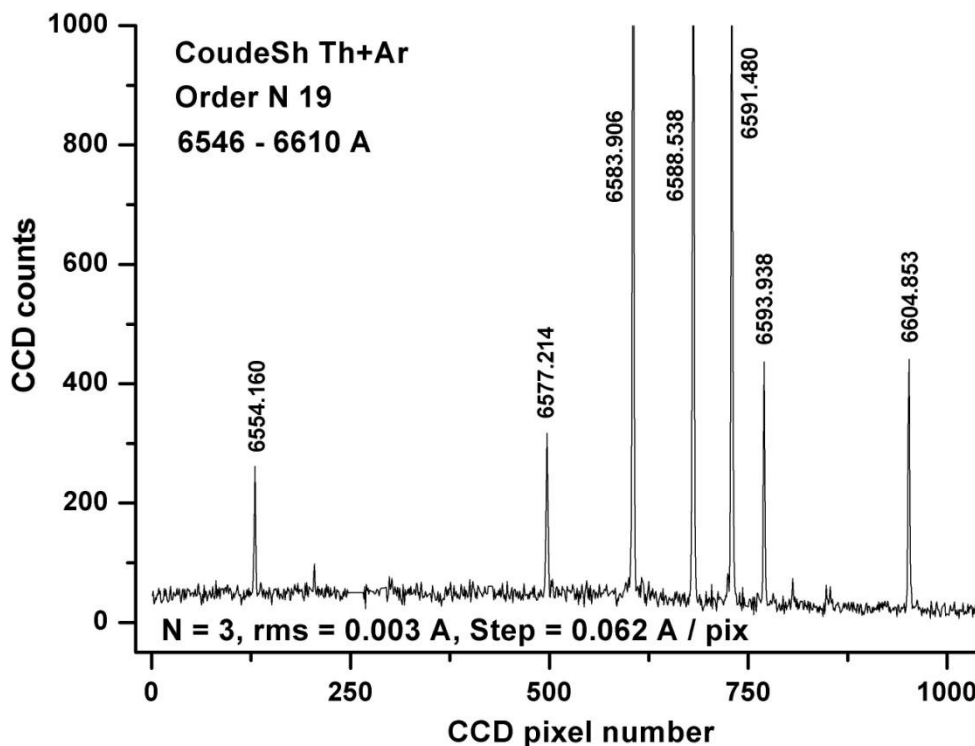


Рис. 3.6. Пример отождествленных линий Th+Ar для эшелле-порядка N 19 в красной области спектра, в который попадает линия H-alpha 6562.8 Ангстрем. Порядок аппроксимации дисперсионной кривой полиномом 3 степени (связь номера пикселя ПЗС-матрицы с длиной волны), при котором невязка лабораторных и измеренных длин волн реперных линий составляет 0.003 Ангстрема.

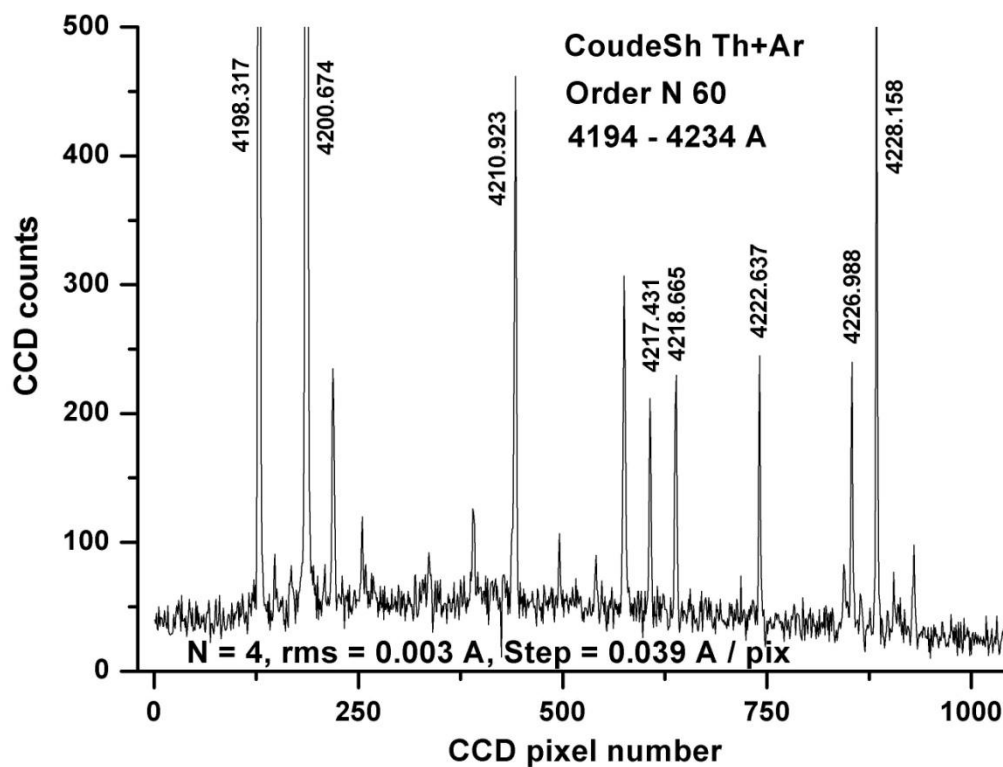


Рис. 3.7. Пример отождествленных линий Th+Ar для эшелле-порядка N 60 в синей области спектра.

На основании данных, подобных показанным на Рис.3.6 и 3.7, составлена Таблица 3.1, в которой для пользователей Кудэ-эшелле спектрометра дана информация о рабочих длинах волн при использовании ПЗС-матрицы САО РАН с форматом 1К x 1К.

Таблица 3.1. Спектральные диапазоны для 68 эшелле-порядков, показанных на рис. 3.4. Спектральное разрешение составляет от 0.13 Å в синей области до 0.25 Å в ближней инфракрасной областях спектра.

Номер порядка	Длина волны, Å	Номер порядка	Длина волны, Å	Номер порядка	Длина волны, Å
01	8688 - 8772	24	6127 - 6186	47	4733 - 4778
02	8533 - 8615	25	6050 - 6108	48	4686 - 4731
03	8383 - 8464	26	5974 - 6031	49	4641 - 4685
04	8239 - 8318	27	5900 - 5957	50	4596 - 4640
05	8099 - 8177	28	5829 - 5885	51	4553 - 4596
06	7964 - 8041	29	5758 - 5814	52	4510 - 4553
07	7834 - 7909	30	5690 - 5745	53	4468 - 4510
08	7707 - 7782	31	5623 - 5677	54	4426 - 4469
09	7585 - 7658	32	5558 - 5611	55	4386 - 4428
10	7467 - 7539	33	5494 - 5547	56	4346 - 4388
11	7352 - 7423	34	5431 - 5484	57	4307 - 4348
12	7241 - 7310	35	5370 - 5422	58	4269 - 4309
13	7133 - 7201	36	5311 - 5362	59	4231 - 4271
14	7028 - 7095	37	5252 - 5303	60	4194 - 4234
15	6926 - 6992	38	5195 - 5245	61	4157 - 4197
16	6827 - 6893	39	5140 - 5189	62	4121 - 4161
17	6731 - 6796	40	5085 - 5134	63	4086 - 4125
18	6638 - 6701	41	5031 - 5080	64	4052 - 4090
19	6547 - 6610	42	4979 - 5027	65	4018 - 4056
20	6458 - 6520	43	4928 - 4975	66	3984 - 4022
21	6372 - 6434	44	4878 - 4924	67	3951 - 3989
22	6288 - 6349	45	4828 - 4875	68	3919 - 3956
23	6207 - 6267	46	4780 - 4826	---	---

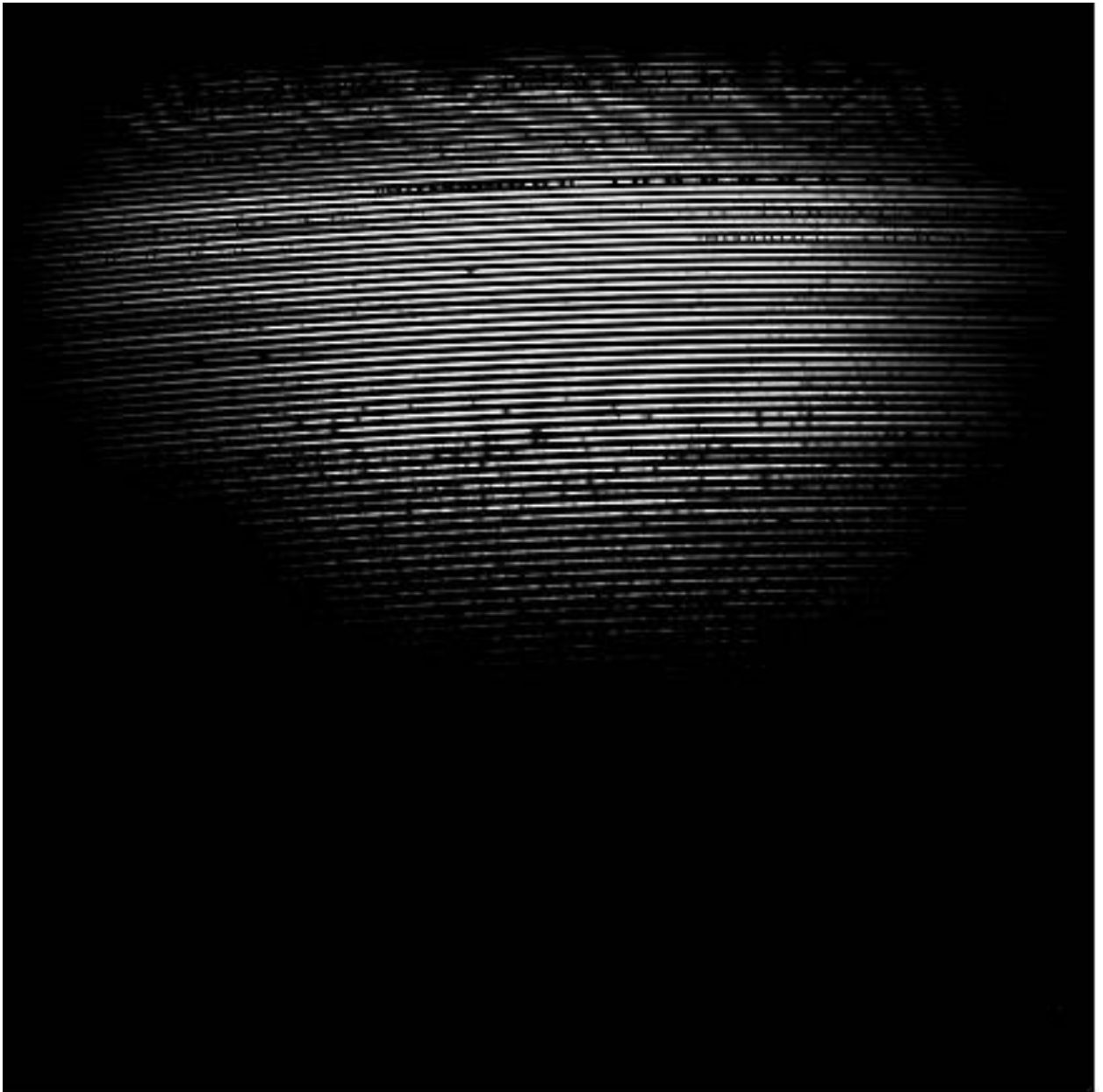


Рис.3.8. Эшелле- кадр, полученный на камере $R = 40000$ с использованием ПЗС-матрицы фирмы ANDOR формата 2048 x 2048.

Все 85 эшелле порядков в диапазоне 4000-8000 Ангстрем регистрируются одновременно без потерь участков спектра слева и справа.

Опыт тестовых наблюдений на камере $R = 40000$ с использованием ПЗС матрицы фирмы ANDOR показал, что при формате чипа 2К x 2К

регистрируется одновременно весь диапазон 4000-8000 Å с полным перекрытием всех порядков (Рис. 2.8).

При работе с камерой $R=100000$, соответственно, необходима ПЗС-матрица формата 4K x 2K для одновременной регистрации указанного спектрального интервала с перекрытием всех эшелле-порядков. Такие ПЗС-матрицы в мире реально уже используются и вопрос оснащения ими данного прибора на РТТ150 - это вопрос времени (финансовых средств).

3.1.2. Позиционная точность спектрометра высокого разрешения

Позиционные и фотометрические калибровки научного оборудования являются необходимым методическим этапом, предшествующим использованию приборов для решения соответствующих научных задач. С этой целью, на РТТ150 были выполнены наблюдения общих звезд, по которым есть опубликованные данные для признанных в мире спектрометров высокого разрешения.

В таблице 3.2 даны результаты измерений автора по спектрам РТТ150 лучевых скоростей звезд из списка высокоточных определений лучевых скоростей (~ 50 м/сек), выполненных на кудэ-эшелле спектрометре ELODIE 1.9-м телескопа Верхний Прованс во Франции. В таблице 3.2 приведены результаты определений лучевых скоростей для обоих спектрометров. Сравнение показывает, что с учетом вычитом систематической поправки в 0.5 км/сек (разность нуль-пунктов сравниваемых спектрометров) остаточные разности находятся, в среднем, в пределах 100 м/сек, что сопоставимо с точностью определений на спектрометре ELODIE.

Таблица 3.2. Результаты сравнения лучевых скоростей стандартных звезд, полученных на РТТ150 и на спектрометре ELODIE 1.9-м телескопа во Франции

Дата, HD номер звезды	Vr, ELODIE	Vr, РТТ150	РТТ150 - ELODIE	(РТТ- ELO)-0.5
May 06, 2004	km/s	km/s	km/s	km/s
101177	-16.95	-16.61	+0.38	-0.12
109358	+ 6.25	+ 6.62	+0.41	-0.09
139323	-67.20	-66.79	+0.45	-0.05
May 07, 2004				
131977	+26.85	+27.45	+0.64	+0.14
140538	+19.00	+19.53	+0.53	+0.03
May 08, 2004				
90343	+ 9.55	+10.14	+0.59	+0.09
140538	+19.00	+19.41	+0.41	-0.09
145742	-21.85	-21.32	+0.53	+0.03
June 06, 2004				
140538	+19.00	+19.47	+0.47	-0.03
164922	+20.15	+20.80	+0.65	+0.15
168009	-64.65	-64.22	+0.43	-0.07
182488	-21.55	-21.14	+0.41	-0.09
			+0.50 mean	+/-0.10 rms

3.1.3. Тестирование предельных позиционных точностей с использованием йодной ячейки

Для проверки предельных позиционных точностей Кудэ-эшелле спектрометра РТТ150 перед его входной щелью была установлена так называемая йодная ячейка (iodine cell), изготовленная в Японии. Йодная ячейка заполнена йодом, который при нагревании до +65 С сублимирует минуя жидкую фазу и находится в газообразном состоянии. Молекула йода I_2 дает многочисленные узкие линии поглощения в диапазоне длин волн 5000-6300 Å, то есть в области наибольшей чувствительности ПЗС-матриц и свободной от сильных теллурических линий земной атмосферы. Длины волн линий поглощения молекулы йода измерены в земных лабораторных условиях с очень высокой точностью и служат высокоточными реперами положений спектра. Во время астрономических наблюдений на спектрометре высокого разрешения в пучок света непосредственно перед входной щелью спектрометра вводится йодная ячейка. В результате на ПЗС-матрице во время экспозиции одновременно регистрируются спектр поглощения звезды и спектр поглощения йода. При обработке таких спектров есть принципиальная и техническая возможность сверхточного измерения смещений спектра звезды относительно несмещенного реперного спектра молекулы йода. Пример сравнения тестовых спектров одной и той же йодной ячейки, полученных автором на РТТ150 и японскими коллегами на Обсерватории Окаяма, показан на Рис. 3.9.

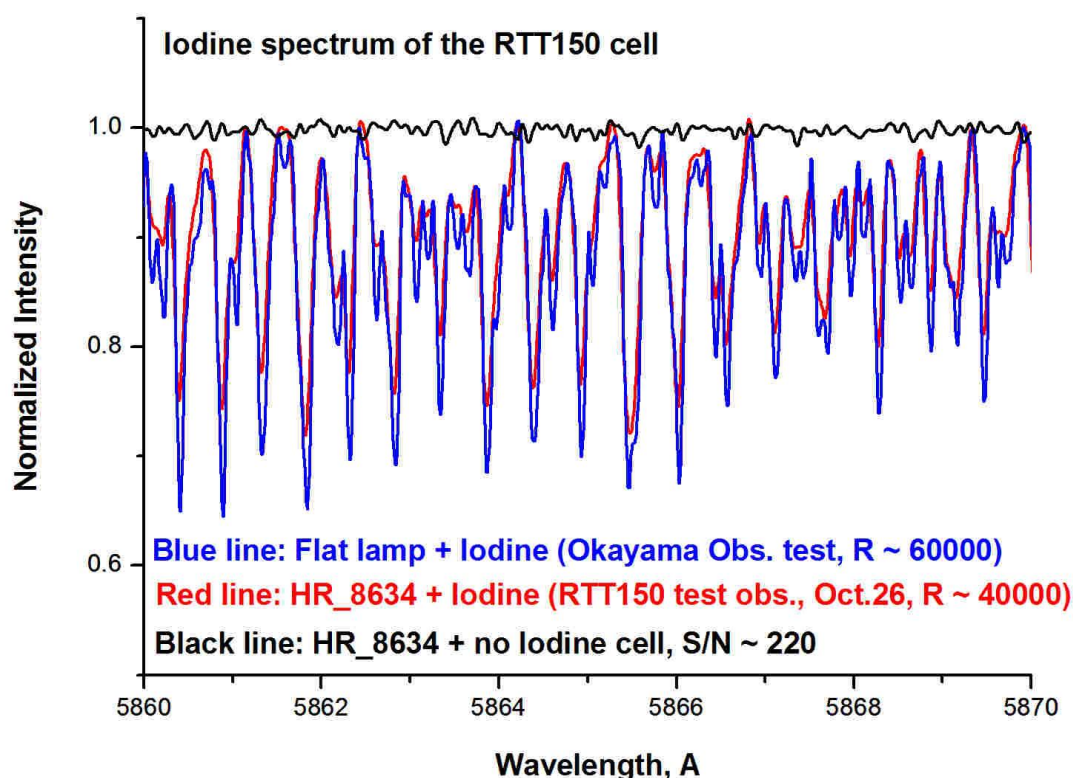


Рис. 3.9. Сравнение спектров одной и той же йодной ячейки, полученной на разных спектрометрах. Положения линий по длине волны совпадают с высокой точностью. Различие в глубинах линий связано с различием в спектральных разрешениях. При использовании ПЗС-матрицы ANDOR на RTT150 в Кудэ-спектрометре, спектральное разрешение увеличится с $R=40000$ до $R = 60000$ и различий в глубинах линий не будет.

Результаты реальных измерений лучевых скоростей 2-х тестовых звезд, спектры которых были получены автором на RTT150, приведены на Рис. 3.10 и 3.11. Видно, что с использованием йодной ячейки достигаются на порядок более высокие точности измерений лучевых скоростей (10-20 метров в секунду), чем показанные в Таблице 3.2 (50-150 метров в секунду). Этот результат позволяет зафиксировать Кудэ-эшелле спектрометр RTT150 на уровне десятка лучших спектрометров в мире по позиционной точности.

Несколько таких спектрометров мира используются в программах поиска планет около звезд солнечного типа. К настоящему времени планеты обнаружены примерно у 500 звезд.

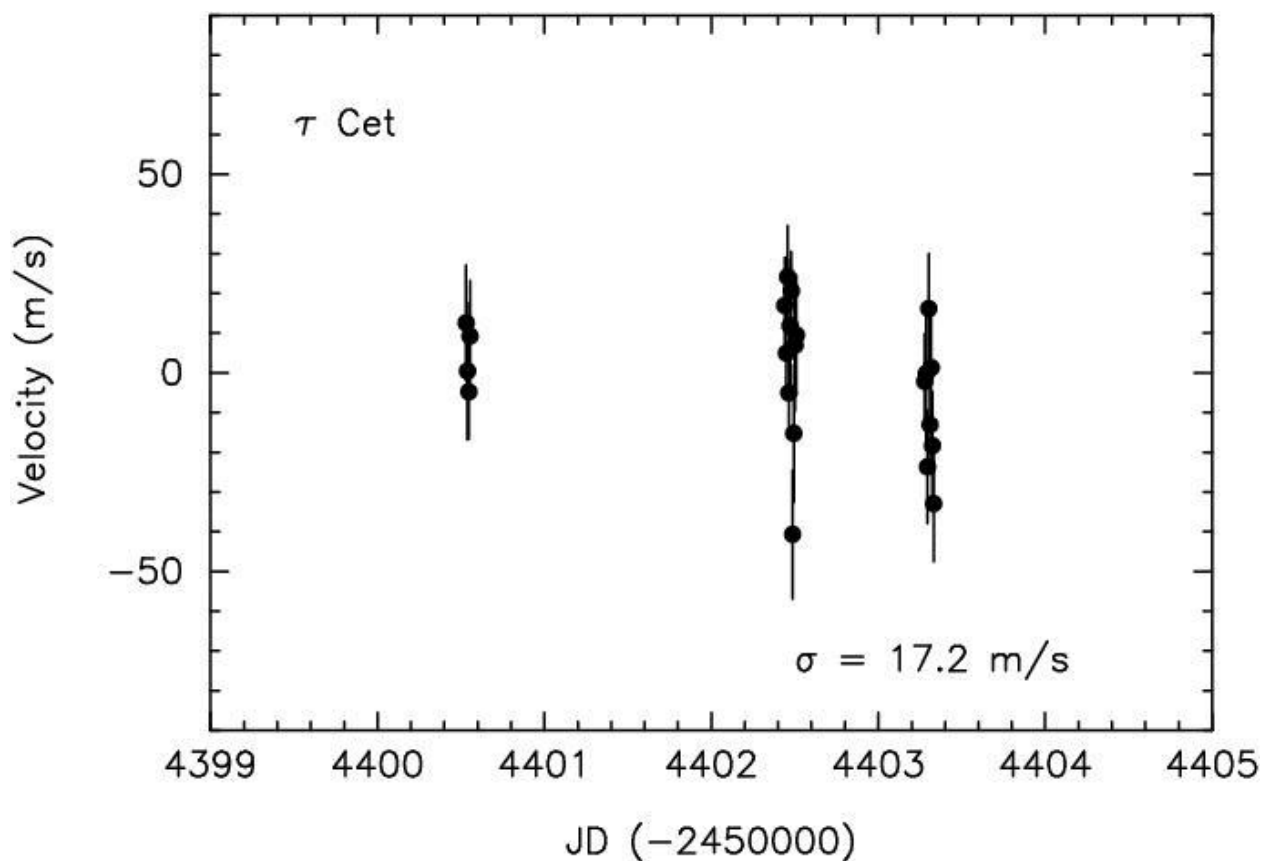


Рис. 3.10. Пример дифференциальных измерений лучевых скоростей контрольной звезды Тау Сет по наблюдениям на РТТ150 в течение 3-х ночей. Среднеквадратичная ошибка измерений составляет 17 метров в секунду для этой звезды.

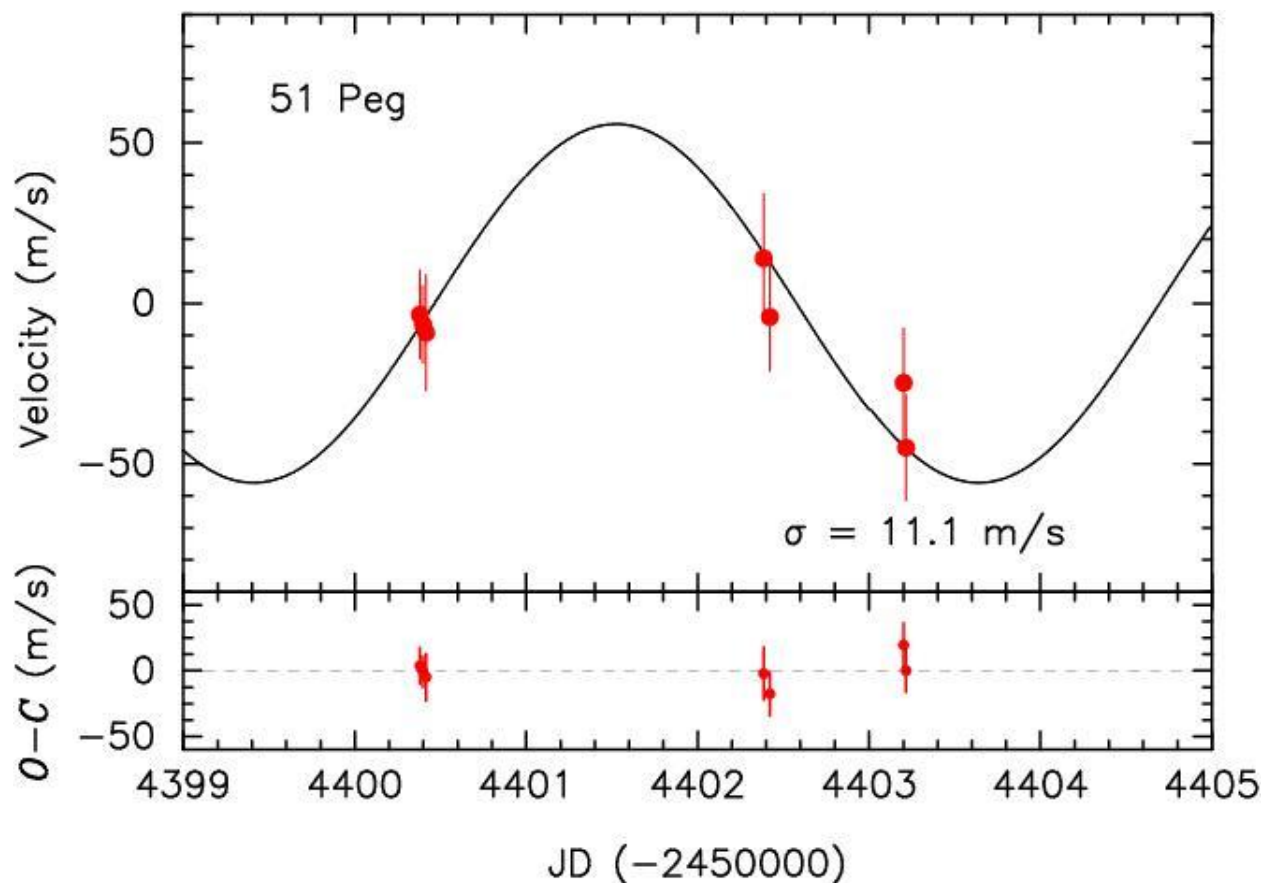


Рис. 3.11. Пример дифференциальных измерений лучевых скоростей звезды 51 Peg (первая звезда с обнаруженной планетой) по наблюдениям на РТТ150 в течение 3-х ночей. Среднеквадратичная ошибка составляет 11 метров в секунду. Показана опубликованная в литературе кривая лучевых скоростей этой звезды с полуамплитудой в 50 метров в секунду.

3.1.4. Фотометрические характеристики спектрометра высокого разрешения

Важной характеристикой спектральных приборов высокого разрешения является уровень систематических и случайных ошибок измерений эквивалентных ширин линий.

На рис. 3.12 дано сравнение эквивалентных ширин линий для звезды HD57006 по наблюдениям на PTT150 и на спектрометре ELODIE во Франции.

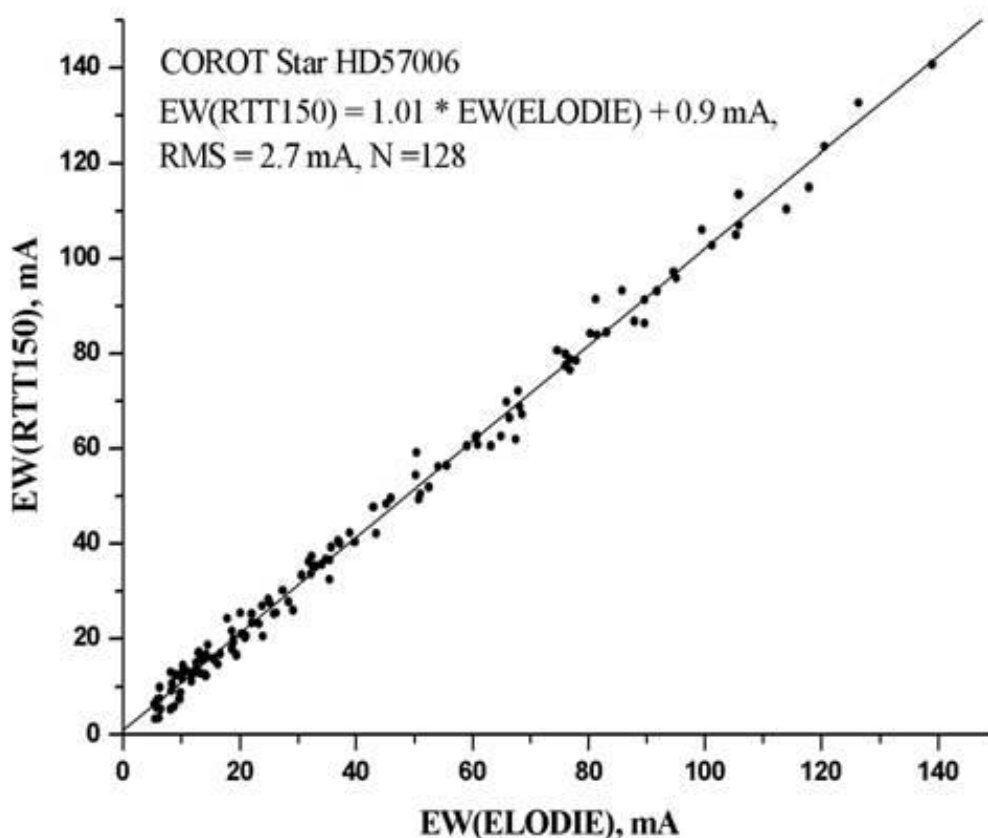


Рис. 3.12. Сравнение эквивалентных ширин линий для F-звезды HD57006

Видно, что в пределах 1 процента системы эквивалентных ширин двух спектрометров совпадают.

На рис.3.13 показано прямое сравнение участков спектра этой звезды, полученных на обоих приборах с одинаковым спектральным разрешением. Наблюдается практическое совпадение спектров в пределах достигнутого отношения сигнал/шум.

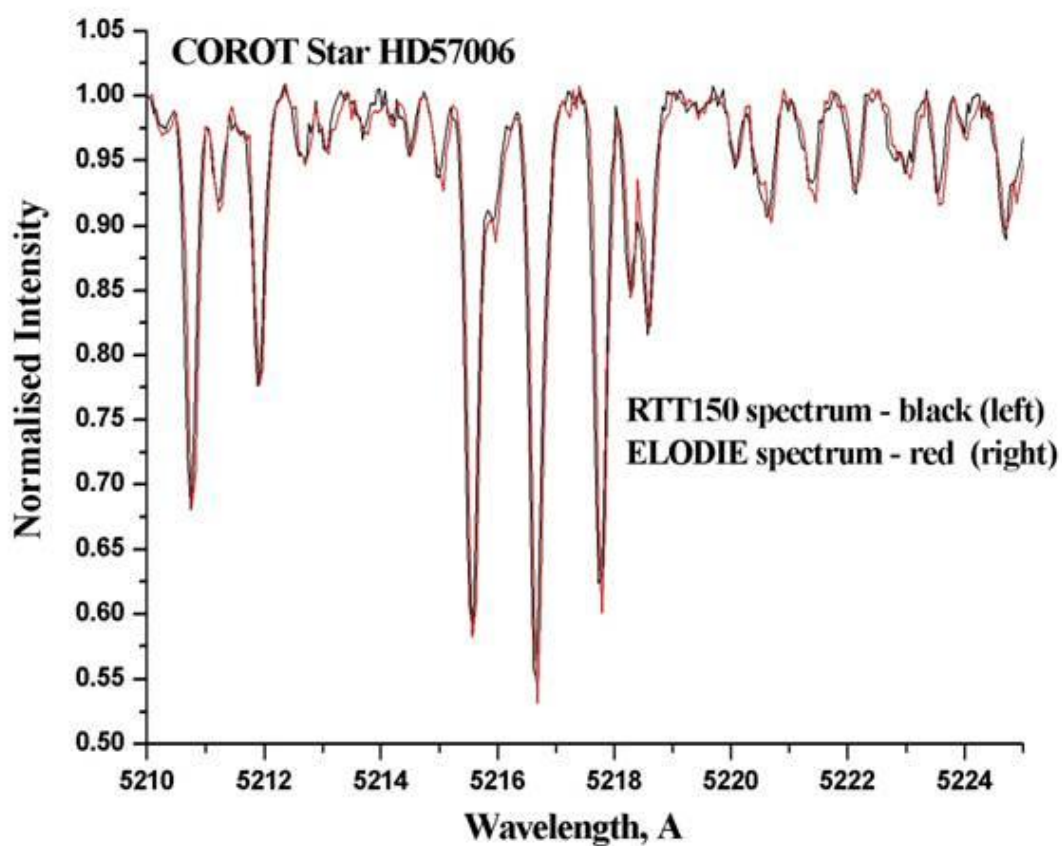


Рис. 3.13. Прямое сравнение участков спектров одной и той же звезды, полученных на 2-х разных спектрометрах.

Для сравнения, на рис. 2.14 показаны эквивалентные ширины для звезды омикрон Пегаса по спектрам РТТ150 и классического спектрометра 1.22-м телескопа Доминионской обсерватории в Канаде, оснащенного ретиконом в качестве детектора.

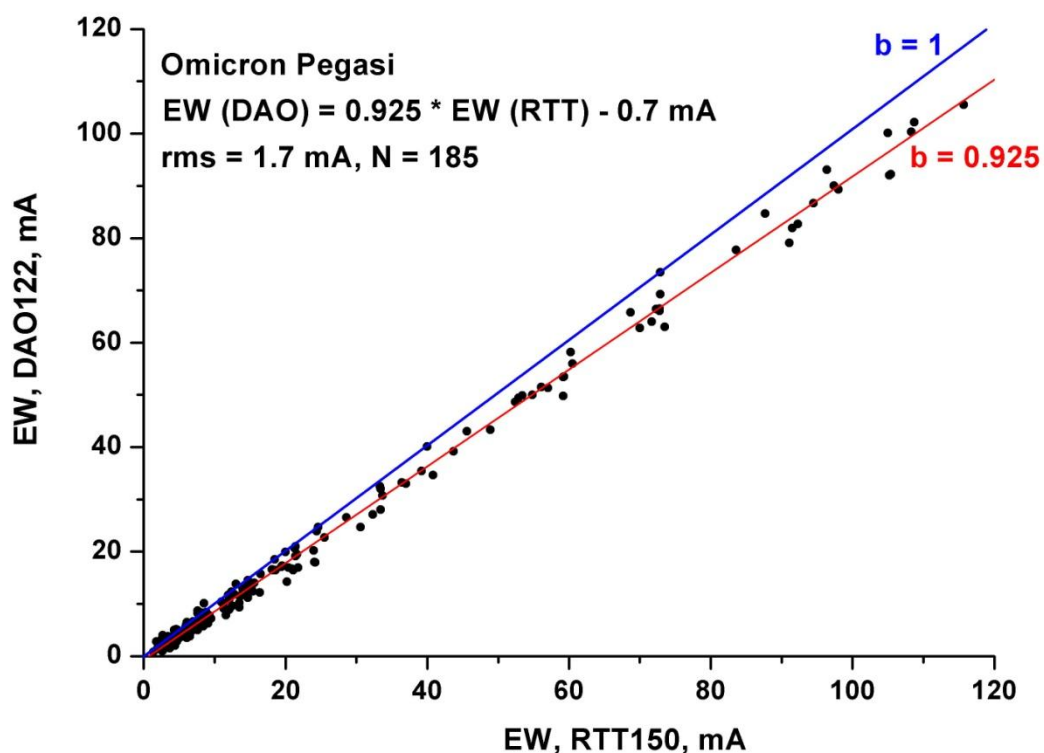


Рис. 3.14. Сравнение эквивалентных ширин линий для Am-звезды Omicron Peg.

Виден эффект систематического занижения эквивалентных ширин линий по спектрам классического спектрометра, что может быть связано с недоучетом рассеянного света в спектрометре на этапе обработки классических спектров. Такая систематическая ошибка в эквивалентных ширинах линий может привести к недооценке микротурбулентной скорости, а также к систематическим ошибкам в определении фундаментальных параметров

атмосфер звезды (эффективная температура, ускорение силы тяжести, содержания химических элементов).

Все эквивалентные ширины линий классических спектрометров, опубликованные в электронных базах, данных должны переводиться в систему эквивалентных ширин современных эшелле-спектрометров. Только после этого может выполняться анализ для извлечения наиболее точной информации о физических условиях и химическом составе звездных атмосфер.

Следует отметить, что указанный вывод распространяется на наиболее точные спектральные данные, где реализуются отношения сигнал/шум $\sim 100-300$ и точность анализа спектров идет на уровне нескольких процентов.

В тех поисковых и исследовательских задачах по исследованию слабых объектов, где точность спектров ограничена 10-20 процентами или хуже, отмеченное выше различие между классическими и эшелле-спектрометрами является несущественным и может, видимо, игнорироваться.

3.1.5. О возможности применения ПЗС-матрицы АНДОР в спектроскопии высокого разрешения.

В результате выполнения методических работ по исследованию характеристик Кудэ-эшелле спектрометра автором было зафиксировано одно важное практическое обстоятельство.

Традиционно считается, что только глубоко (азотно) охлаждаемые до -100-120 градусов Цельсия ПЗС-матрицы обеспечивают необходимую высокую фотометрическую точность, тем более при спектроскопических наблюдениях. Автором было выполнено тестирование термоэлектрически охлаждаемой до -60 С ПЗС-матрицы фирмы ANDOR путем спектральных наблюдений на обоих камерах Кудэ-эшелле спектрометра РТТ150. Было выполнено сравнение эквивалентных ширин линий для одной и той же звезды, спектры

которой были получены с использованием разных ПЗС-матриц. В качестве опорной звезды для сравнения эквивалентных ширин линий была выбрана звезда класса A8 V HD32115, имеющая малую скорость вращения (10 км/сек) и многочисленные узкие линии металлов в спектре.

На рис. 3.15 и 3.16 показаны результаты сравнения эквивалентных ширин линий в спектре этой звезды, полученные по наблюдениям на РТТ150 с ПЗС-матрицами САО РАН (-120 С) и АНДОР (-60 С) и по наблюдениям на куде-эшелле спектрометре 2-м телескопа на пике Терскол с применением ПЗС-матрицы фирмы Wright Instruments (-120 С). Видно, что эквивалентные ширины согласуются в пределах 1-1.5 процента в систематическом отношении для всех 3-х ПЗС-матриц.

Это обстоятельство имеет очень важный практический момент - ПЗС-матрица фирмы АНДОР не требует откачки воздуха в течении гарантийного срока в 5 лет и не требует заливки азота. При этом незначительные темновые шумы для отдельных пикселей являются линейными функциями времени и хорошо вычитаются на этапах обработки изображений.

Уровень в 1 процент для эквивалентных ширин линий является вполне рабочим для подавляющего большинства задач в спектроскопии высокого разрешения. В связи с этим, мы можем рекомендовать такие профессиональные ПЗС-матрицы с термоэлектрическим охлаждением до -60-70 С для использования в задачах звездной спектроскопии.

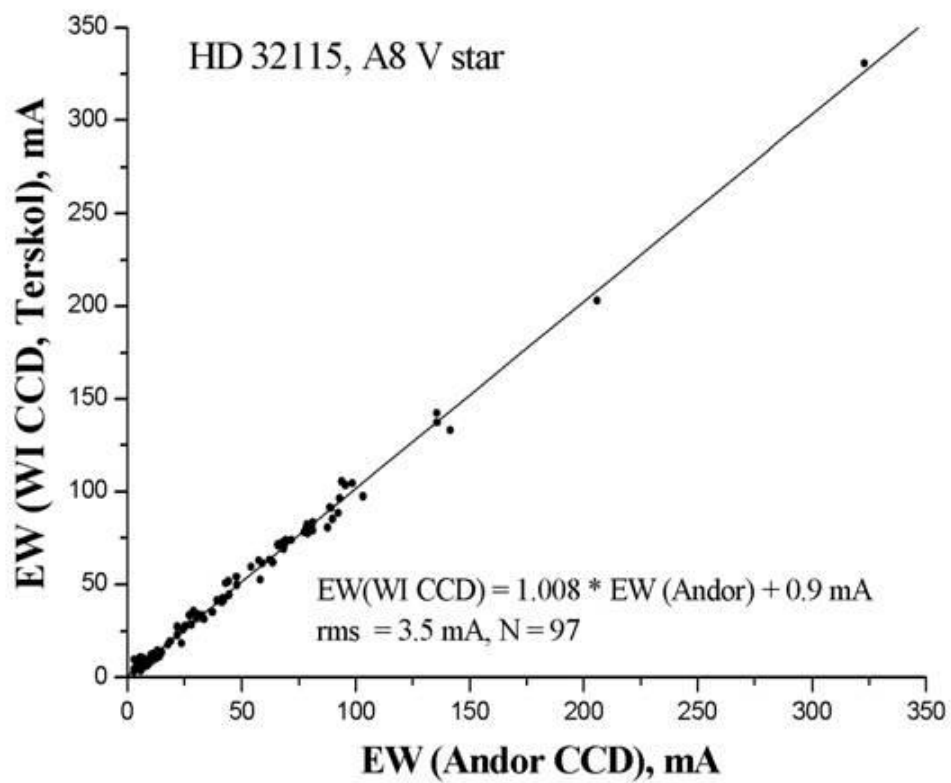


Рис. 3.15. Сравнение эквивалентных ширин линий для А-звезды HD32115, полученных с использованием азотно-охлаждаемой (-120 C) ПЗС-матрицы фирмы Wright Instruments и термоэлектрически охлаждаемой (-60 C) ПЗС-матрицы фирмы ANDOR.

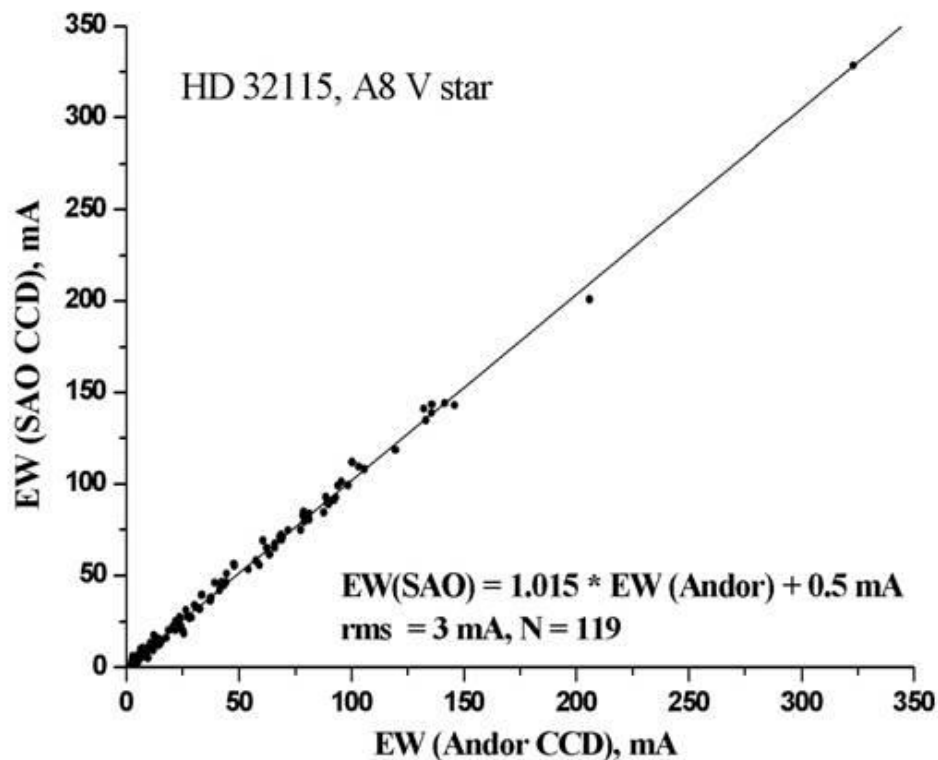


Рис. 3.16. Сравнение эквивалентных ширин линий для А-звезды HD32115, полученных с использованием азотно-охлаждаемой (-120 С) ПЗС-матрицы фирмы изготовленной в САО РАН и термоэлектрически охлаждаемой (-60 С) ПЗС-матрицы фирмы АНДОР. В обоих случаях была ПЗС-матрицы были установлены автором на одной и той же спектральной камере R = 40000 Кудэ-эшелле спектрометра РТТ150.

Выводы. Таким образом, по своим фотометрическим и позиционным характеристикам Кудэ-эшелле спектрометр РТТ-150 не уступает лучшим спектрометрам в мире и может быть использован для получения высокоточных спектров звезд до 8-9 звездной величины.

3.2. Фотометр на основе ПЗС-матрицы фирмы ANDOR

До момента приобретения для 1.5-м телескопа ПЗС-матрицы ANDOR в 2003 году, в фотометрических наблюдениях использовались две малоформатные термоэлектрически охлаждаемые ПЗС-матрицы:

- 1) ПЗС-матрица ST8E (охлаждаемая до -25 С) производства фирмы Santa-Barbara, США, приобретенная за счет ИКИ РАН. Формат чипа 1530 x 1020 пикселей с размером пикселя 9 микрон, что соответствовало угловому полю зрения 4 x 2.5 минуты. С этой ПЗС-матрицей были выполнены принципиально важные работы по юстировке методом Гартмана оптической системы F/8 и были реализованы несколько первых научных программ по оптическому отождествлению и фотометрии рентгеновских скоплений галактик (ИКИ РАН), фотометрическому мониторингу гравитационно-линзированного квазара SBS1520+530, и т.д. Однако, данная ПЗС ограничивала возможности РТТ150 как по детектированию слабых источников, так и по фотометрической точности и используемому полю зрения. Она не позволяла выйти на уровень точности в 1-2 процента даже для относительно ярких источников из-за нелинейностей при считывании заряда, зависящей также от геометрического положения звезды в поле ПЗС-матрицы.
- 2) Поэтому в 2002 году матрица ST8E была заменена на более совершенную ПЗС-матрицу AP47p (охлаждаемую до -40 С) фирмы Apogee, США. (приобретена за счет МПА, Германия). Формат матрицы 1024 x 1056 пикселей (размером 13.5 микрон каждый), что соответствовало угловому полю зрения 4 x 4 угловые минуты. С этой матрицей было выполнено несколько научных фотометрических программ, в том числе по поиску новых переменных звезд. К сожалению, не очень глубокое охлаждение и небольшой формат этой ПЗС-матрицы также ограничивали поле зрения и фотометрические точности РТТ150.

ПЗС-матрица фирмы ANDOR

Для вывода ПЗС-фотометра РТТ150 на современный технологический и методический уровень автором был выполнен поиск западного производителя готовых коммерческих ПЗС-систем, обеспечивающего наилучшее сочетание цена/качество. В результате поисков по десяткам сайтов производителей ПЗС и общения с ними по ИНТЕРНЕТ автором был сделан выбор в пользу ПЗС-матрицы фирмы ANDOR, расположенной в Северной Ирландии, Белфаст. Эта фирма научилась изготавливать ПЗС-камеры, охлаждаемые термоэлектрически до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, из которых откачан воздух. Фирма дает гарантию вакуума на 5 лет. Необходимость в приобретении термоэлектрически охлаждаемой ПЗС-матрицы была вызвана трудностями с доставкой жидкого азота на Обсерваторию в зимние месяцы (ноябрь-апрель), когда дорога на гору блокирована снегом. Опыт работы с ПЗС-матрицей фирмы ANDOR формата 2048×2048 элементов (приобретенной Институтом им.Макса Планка, Германия, для совместных исследований на 1.5-м телескопе) показал высокое качество электроники и стабильность, обеспечивающие фотометрическую точность на уровне не хуже 1 процента, что было подтверждено многочисленными наблюдениями фотометрических и спектроскопических стандартов с этой ПЗС-системой.

3.2.1. Основные технические характеристики ПЗС-матрицы ANDOR

На рис. 2.20 показано место установки ПЗС-матрицы ANDOR в фокусе Ричи-Кретьена.



Рис. 3.17. Место установки ПЗС-матрицы в фокусе Ричи-Кретьена РТТ150.

Основные технические характеристики ПЗС АНДОР следующие:

Формат чипа 2048 x 2048 пикселей,

Размер пикселя – 13.5 мкм, что соответствует масштабу 0.24 "/pixel

Эффективная площадь – 27.6 x 27.6 мм, что соответствует полю 8 x 8 угловых минут

Термоэлектрическое охлаждение – 60 С

Квантовая чувствительность в максимуме – 95 процентов (5500 А)

Шум считывания – 2.5 электрона

Время считывания полного кадра 2048 x 2048 - 70 секунд, при скорости считывания 1 пикселя в 16 микросекунд.

Время считывания полного кадра 1024 x 1024 (группировка 2 x 2) - 35 секунд,

ПЗС-система позволяет выделять для экспонирования избранные участки на чипе и таким образом уменьшать время считывания суб-кадра до нескольких секунд.

Имеется также возможность использования так называемых кинетических серий, при которых время считывания суб-кадра может быть уменьшено до долей секунд и есть возможность накопления длинных временных рядов в оперативную память ПЗС-системы для исследования быстрых переменных явлений.

Механическая конструкция для ПЗС-фотометра ANDOR была изготовлена в ИКИ РАН. Внутри конструкции размещена ПЗС-матрица AP47p, которая используется в качестве офсетного автогида.

ПЗС фотометр снабжен двумя турелями квадратных фильтров (50 x 50 x 5 мм) со стандартными системами BESSEL (UBVRcIc) и SDSS (u', g', r', i', z').

Опыт наблюдений с ПЗС ANDOR показал возможность регистрации объектов до 23.5-24 звездной величины за пару часов суммарной экспозиции при качестве изображений 1-1.5 угловых секунд и фотометрической точности 10-20 процентов.

3.2.2. Фотометрическая система

Фотометрическая система калибруется относительно звезд-стандартов Ландольта. Пример фотометрических калибровок показан в нижеследующих уравнениях. Из них следует, что кривая чувствительности ПЗС-матрицы и кривые пропускания фильтров обеспечивают выполнение фотометрических наблюдений в системе, практически совпадающей с международной. Об этом говорят коэффициенты в последней колонке при цветах.

Поглощение земной атмосферы в месте установки телескопа дает следующие средние значения для коэффициентов экстинкции – $X(B) = 0.19 \text{ mag}$, $X(V) = 0.14 \text{ mag}$, $X(R) = 0.09 \text{ mag}$, $X(I) = 0.05 \text{ mag}$ Однако, наблюдаются вариации этих величин от ночи к ночи, что говорит о переменности прозрачности

атмосферы и индивидуальном учете в ночь наблюдений.

$$b=B+1.58(0.03)+0.19(0.02)*X_b-0.18(0.04)*(B-V)+0.03(0.03)*X_b*(B-V)$$

$$v=V+1.49(0.02)+0.14(0.02)*X_v-0.06(0.03)*(B-V)+0.06(0.02)*X_v*(B-V)$$

$$r=R+1.43(0.03)+0.09(0.02)*X_r+0.02(0.06)*(V-R)+0.03(0.04)*X_r*(V-R)$$

$$i=I+1.89(0.04)+0.05(0.03)*X_i-0.06(0.04)*(V-I)+0.02(0.03)*X_i*(V-I)$$

3.3. Камера прямых изображений и спектрометр низкого и среднего разрешения TFOSC

Прибор TFOSC, полностью создан в Астрономической обсерватории Копенгагенского университета (Дания) по заказу Государственной обсерватории ТЮБИТАК и является вкладом турецкой стороны в состав научного оборудования РТТ-150.

Автором были выполнены калибровки длин волн для всех спектральных вариантов наблюдений, а также тестирование точности определения лучевых скоростей звезд. Автором первым были получены научные результаты с использованием данного прибора на РТТ150, связанные со спектральными наблюдениями слабых внегалактических источников.

3.3.1. Механическая и оптическая схемы TFOSC

TFOSC (TUBITAK FOSC) - это модифицированный вариант приборов серии FOSC (Faint Objects Spectrometer and Camera), изготовленных в астрономической обсерватории Копенгагенского университета для десятка телескопов мира с диаметрами зеркал 1.5-2.5 метра.

Он состоит из фокального редуктора, трансформирующего пучок F/8 в пучок F/5.5 Это необходимо для увеличения рабочего поля зрения телескопа

при использовании ПЗС-матриц ограниченных по геометрическому размеру даже при формате 2048 x 2048 элементов.

После многолинзового коллиматора в параллельном пучке установлены турели для фильтров и прозрачных дифракционных решеток и призм (гризм).

В качестве приемника используется азотно-охлаждаемая ПЗС-матрица формата 2048x2080 элементов (15 микрон каждый).

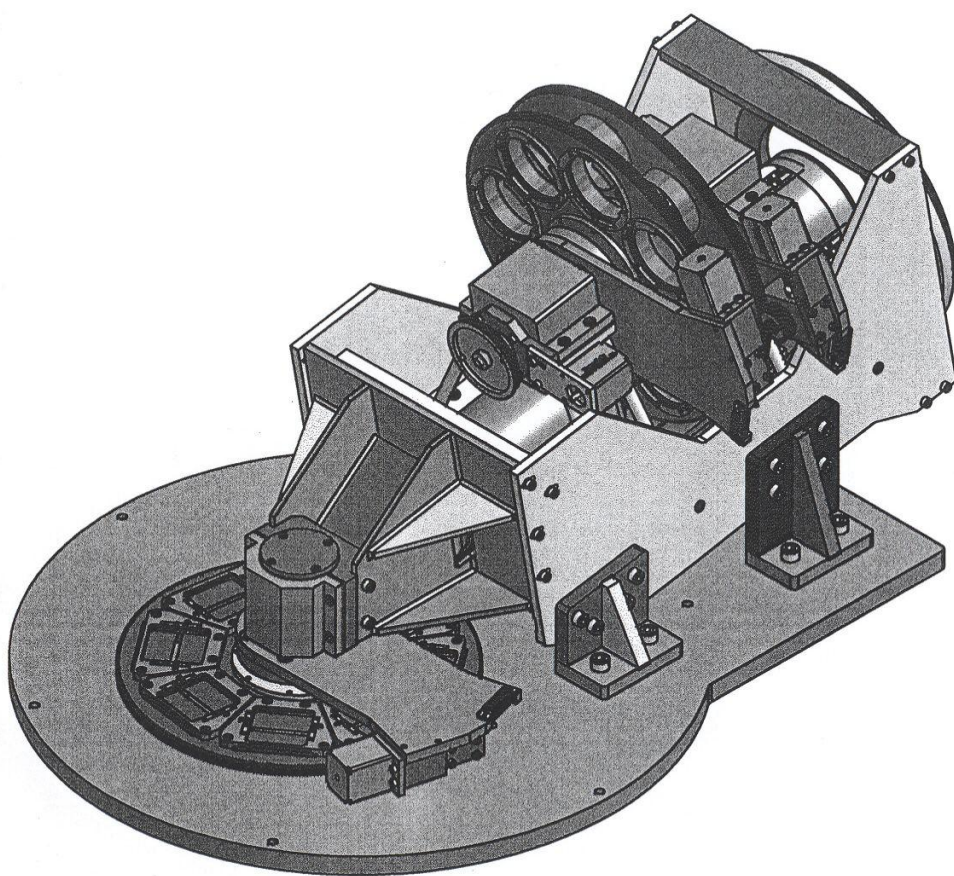


Рис. 3.18. Механическая схема прибора TFOSC

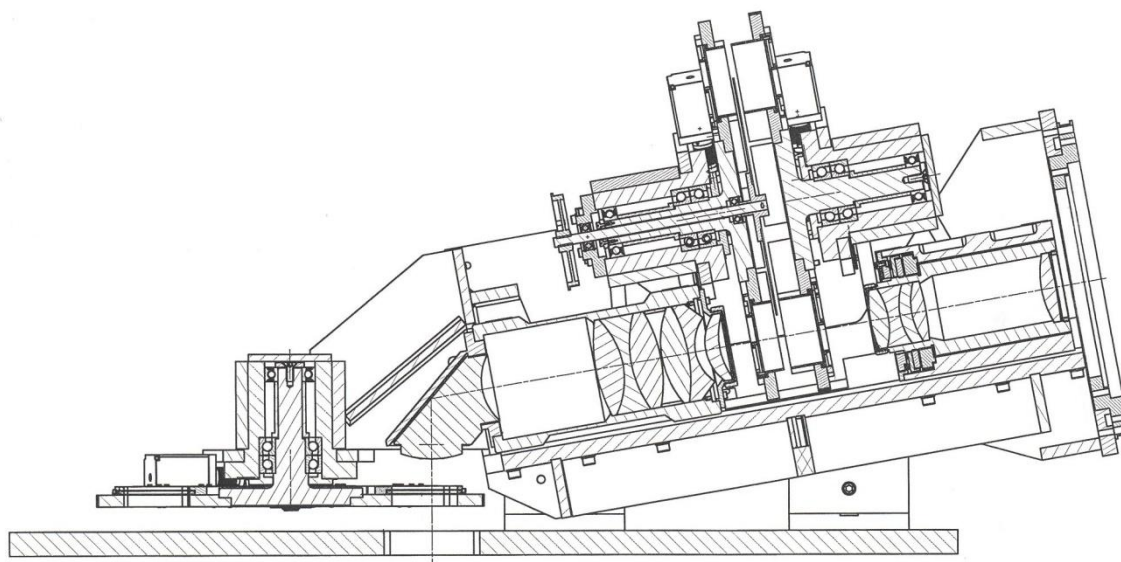


Рис. 3.19. Оптическая схема прибора TFOSC

В зависимости от наблюдательной задачи прибор позволяет получать:

- прямые изображения с полем зрения 14×14 угловых минут и масштабом 0.4 угловые секунды на пиксель,
- спектры низкого (5 - 15 Ангстрем) разрешения с использованием прозрачных дифракционных решеток.
- спектры среднего (2-3 Ангстрема) разрешения (в эшелле моде).

Также как и вышеуказанный ПЗС-фотометр, прибор TFOSC снабжен отдельным офсетным гидом, который установлен в нерабочей зоне поля зрения системы F/8 и снабжен отдельной, термоэлектрически охлаждаемой ПЗС. Она используется для контроля положения опорных (гидировочных) звезд и передачи команд в систему управления телескопа для тонкой коррекции положения телескопа в ходе рабочих экспозиций.

Использование офсетного гида позволяет сохранять атмосферное качество изображений в ~ 1.5 угловых секунд в течение характерных экспозиций в 10-30 минут и удерживать объекты на входной щели при использовании

спектральной моды прибора.

Опыт наблюдений с TFOSC показал возможность регистрации спектров объектов до 20-й величины с разрешением 10-15 ангстрем для задач спектральной классификации звездных и внегалактических объектов, и объектов 12-13 величины в эшелле-моде с разрешением 3 Ангстрема и высоким отношением сигнал / шум для задач количественного спектрального анализа или измерений лучевых скоростей для исследования кинематики звезд Галактики или звезд в двойных системах.

Также как и вышеуказанный ПЗС-фотометр, прибор TFOSC снабжен наборами стандартных фильтров систем BESSEL (UBVRcIc) и SDSS (u', g', r', i', z').

3.3.2. Предельные точности определения лучевых скоростей с прибором TFOSC

На Рис. 3.20 приведен эшелле-кадр калибровочной лампы Fe+Ar, полученный в эшелле-моде прибора TFOSC

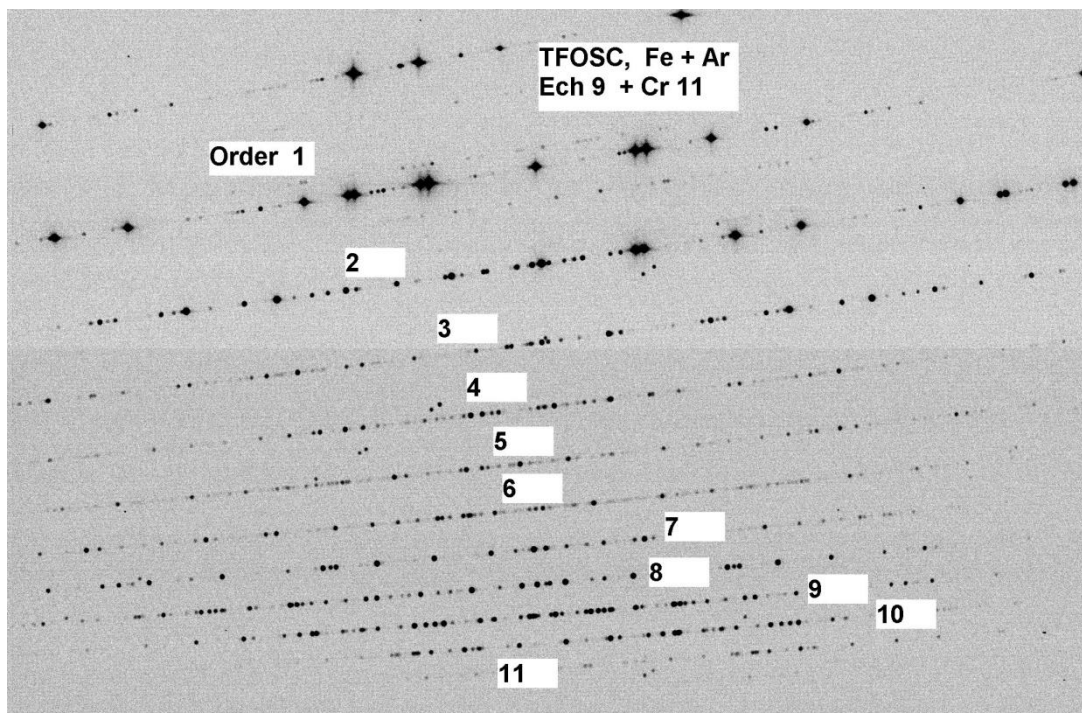


Рис. 2.20. Эшелле спектр калибровочной лампы Fe+Ar, содержащий 11 эшелле-порядков в диапазоне длин волн 3800 – 9300 Å с разрешением 3 Å.

Для каждого из 11 эшелле порядков автором была выполнена идентификация спектральных линий. Пример для порядка N 3, содержащего линию H-alpha, показан на рис. 3.21.

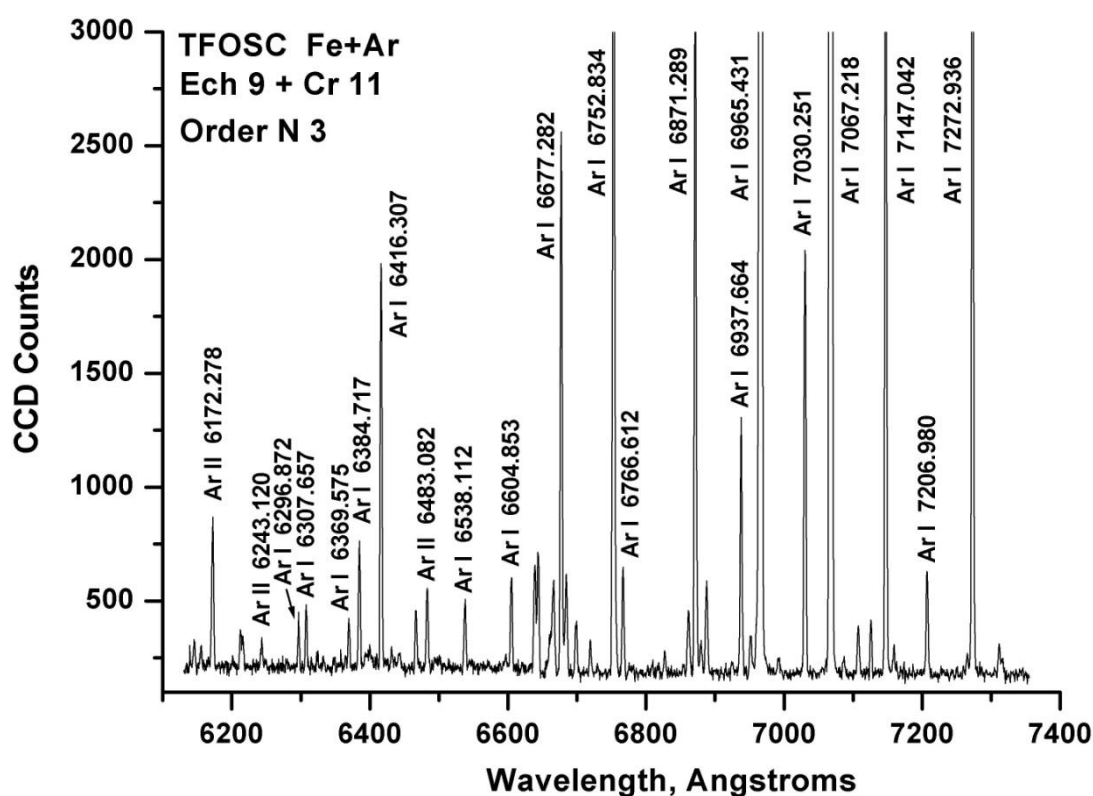


Рис. 3.21. Пример идентификации линий в спектре калибровочной лампы для построения дисперсионной кривой.

Такие идентификации были использованы для перевода спектров в шкалу длин волн и определения лучевых скоростей стандартных звезд.

В Таблице 3.3 даются результаты измерений автора лучевых скоростей

стандартных звезд, спектры которых получены в эшелле моде TFOSC.

Таблица 3.3. Результаты измерений лучевых скоростей с использованием эшелле моды прибора TFOSC.

Star	V	Sp.Type	TFOSC RV, km/s	Standard RV, km/s	Difference, TFOSC – Standard RV, km/s
HD 114762	7.3	F9V	+47.6	+49.4	- 1.8
HD 144579	6.7	G8V	-59.5	-59.5	0
HD 182572	5.2	G8IV	-101.5	- 100.4	-1.1
HD 184499	6.6	G0V	-166.6	- 166.1	-0.5

Видно, что ошибка определения лучевых скоростей при использовании моды среднего разрешения составляет ~ 1 км в секунду. Такая высокая точность может быть востребована в задачах по исследованию кинематики звезд Галактики.

Заключение

В результате совместных работ участников проекта был создан комплекс современного научного оборудования телескопа РТТ150. Автором были исследованы фотометрические и спектральные характеристики всех 3-х приборов и получены результаты, свидетельствующие о возможности регистрации высокоточных спектральных и фотометрических данных с использованием этих приборов.